物理学和哲学

〔西德〕W·海森伯 著

商 务 印 书 馆

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

53·36
435

物 理 学 和 哲 学

现代科学中的革命

〔西德〕W. 海森伯 著
范岱年 译



商 务 印 书 馆
1981·北京

1109947

D670 3

W. Heisenberg
PHYSICS AND PHILOSOPHY
(The Revolution in Modern Science)
George Allen and Unwin
1958

内容简介

本书作者是量子力学的创始人，哥本哈根学派的主要代表人物之一。本书从量子论建立的历史谈起，讨论了现代物理学中的主要哲学问题，并牵涉到哲学史、语言学、逻辑的一些问题和物理学的社会作用的问题。书中较系统地阐述了哥本哈根学派的基本哲学观点，是该学派的有代表性的哲学著作。

附录中收录了诺斯劳普为英文版写的“序言”，以及海森伯在晚年发表的四篇文章。

本书可供物理学、物理学史和哲学研究工作者、大中学校物理、哲学教师参考。

物理学和哲学
现代科学中的革命
〔西德〕W.海森伯 著
范岱年 译

商务印书馆出版
（北京王府井大街36号）
新华书店北京发行所发行
外文印刷厂印刷
统一书号：2017·263

1981年7月第1版　　开本850×1168 1/32
1981年7月北京第1次印刷　　字数170千
印数 1—9,100 册　　印张7 1/4
定价：0.93 元

目　　录

第一章　老传统和新传统…………………………………………1
第二章　量子论的历史……………………………………………3
第三章　量子论的哥本哈根解释……………………………14
第四章　量子论和原子科学的渊源…………………………25
第五章　自笛卡儿以来哲学观念的发展
　　和量子论的新形势的比较……………………………………38
第六章　量子论和自然科学其他部分的关系……………52
第七章　相对论…………………………………………………65
第八章　对量子论的哥本哈根解释的批评
　　和反建议………………………………………………………80
第九章　量子论和物质结构…………………………………94
第十章　现代物理学中的语言和实在……………………109
第十一章　现代物理学在当前人类思想
　　发展中的作用…………………………………………………124
附录：英文本序言（F. S. C. 诺斯劳普）……………………139
　　科学真理和宗教真理……………………………………160
　　量子论历史中概念的发展………………………………174
　　基本粒子是什么？…………………………………………188
　　宇宙辐射和物理学中的基本问题………………………203
译后记……………………………………………………………215

第 一 章

老传统和新传统

今天，当人们谈到现代物理学时，首先就想到原子武器。人人都认识到这些武器对现代世界政治结构的巨大影响，并且都心悦诚服地承认物理学对一般政治形势的影响比以往任何时期都要大。但是，现代物理学的政治方面真的是它的最重要的方面吗？当世界上的政治结构已变得适应于新技术的种种可能性时，现代物理学还将留下什么影响呢？

为了回答这些问题，应当记住，每个工具都带有用来创造它的那种精神。因为每个国家和每个政治集团，不管它的地理位置和文化传统如何，都必须以某种方式关心这种新武器，所以，现代物理学的精神必将渗透到许多人的心灵之中，并以各种不同的方式和老传统联系起来。现代科学的这个特殊部门对各种强有力的老传统进行冲击的结果将是什么呢？世界上已经发展了现代科学的那些地区，长时期来，主要兴趣是在实用的活动方面，在工业和与这种活动的内外条件的合理分析相结合的工程学方面。这些地区的人觉得应付这些新观念是颇为容易的，因为他们已经有充分时间慢慢地、逐渐地来适应现代科学的思想方法。在世界的其他地区，这些观念将同本地文化的宗教基础和哲学基础发生冲突。因为现代物理学的成果确实触及实在、空间和时间这样一些基本概念，所以，这种冲突可能引起全新的、难以预料的发展。在现代科学和旧思想方法之间这次决战的特征之一，就在于它完全是国际性的。在这次思想交流中，老传统的一方在世界不同地区是不同

1109947

的，而它的对方则在任何地区都是一样的，因此，这次思想交流的结果将传播到发生论战的全部地区。

由于这样的理由，尝试用不太技术性的语言来讨论现代物理学的这些观念，研究它们的哲学影响，将它们和若干较老的传统相比较，可能不是一个无关紧要的任务吧。

对量子论的发展作一历史性描述，可能是着手讨论现代物理学问题的最好的方法。确实，量子论仅仅是原子物理学中的一个小分支，而原子物理学又是现代科学中的一个很小的分支。然而，正是在量子论中，关于实在的概念发生了最基本的变化，并且也是在量子论中，原子物理学的新观念集合并具体化为它的最后的形式。原子核物理学研究所需的巨大的、非常复杂的实验设备，显示了这一现代科学部门的另一非常激动人心的方面。说到实验技术，原子核物理学代表了自从惠更斯(Huyghens)、伏打(Volta)或法拉第(Faraday)以来一直决定着现代科学成长的研究方法的最大扩展。与此相似，量子论某些部分的令人望而生畏的数学复杂性，也可以说是代表着牛顿(Newton)、高斯(Gauss)或麦克斯韦(Maxwell)的方法的最高成就。但是，在量子论中显示的实在概念的变化，并不是过去的简单的继续，而却象是现代科学结构的真正破裂。因此，下一章首先将致力于探讨量子论的历史发展。

第 二 章

量子论的历史

量子论的起源是和一个大家熟悉的现象相联系的，这一现象并不属于原子物理学的中心部分。任何一块物质在被加热时，都会开始发光，并在较高温度下达到红热和白热。发光的颜色与材料表面关系不大，而对于黑体，则只与温度有关。因此，这样一个黑体在高温下发出的辐射是物理学研究的适当对象；它是一个简单的现象，并且应该可以根据已知的辐射和热学定律找到一个简单的解释。但是，瑞利勋爵(Lord Rayleigh)和琼斯(Jeans)在十九世纪末所作的努力却失败了，并且揭示了种种严重的困难。这里无法以简单的词句描述这些困难。但只要指出他们应用已知定律不能导出合理的结果这一点，应该也就够了。当普朗克(Planck)在1895年进入这条研究路线时，他试图将问题从辐射转到辐射原子方面。这种转换不能消除问题中固有的任何困难，它只简化了经验事实的解释。正当这个时候，即在1900年的夏天，库尔包姆(Curlbaum)和鲁本斯(Rubens)在柏林对热辐射光谱作了很准确的新测量。当普朗克听到这些结果时，他试图根据他对热与辐射的一般联系的研究，用简单的、看来好象是合理的数学公式来表示它们。有一天，普朗克和鲁本斯在普朗克家中喝茶，他们将鲁本斯的最新结果和普朗克提出的新公式作比较。比较的结果表明二者完全相符。这就是普朗克热辐射定律的发现。

就在这个时候，普朗克开始了艰巨的理论工作。什么是新公式的正确物理解释呢？既然普朗克能根据他以往的工作把他的公

式毫不费力地翻译成关于辐射原子(所谓振子)的陈述，那么他一定很快就发现了，他的公式似乎表明振子只能包含分立的能量子——这个结果与经典物理学中任何已知的东西是那么不同，以致他在开始的时候一定会觉得难以相信。但是，在1900年夏天最紧张的工作时期中，他终于确信无法避免这个结论。普朗克的儿子曾说，他的父亲曾在通过柏林近郊的森林——绿林的漫长的散步中谈到了他的新观念。在这次散步中，他解释说，他感到他可能已经完成了一个第一流的发现，或许只有牛顿的发现才能和它相比。所以，这个时候普朗克一定认识到了，他的公式已经触动我们描述自然的基础，并且有朝一日，这些基础将从它们现有的传统位置向一个新的、现在还不知道的稳定位置转移。普朗克由于在整个世界观上是保守的，他根本不喜欢这个后果，但他还是在1900年12月发表了他的量子假说。

能量只能以分立的能量子发射或吸收，这个观念是这样新奇，以致它不能适合物理学的传统框架。普朗克企图把他的新假说和老的辐射定律调和起来的尝试，在几个根本点上都失败了。这一尝试花了五年时间，直到能够朝新方向迈出第二步时为止①。

这时候出现了年轻的阿耳伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)，物理学家中的一个有革命性的天才，他不怕进一步背离旧的观念。他在两个问题中应用了新观念。一个就是所谓光电效应，即金属在光的作用下发射出电子。许多实验——特别是勒纳(Lenard)的那些实验——都表明，发射电子的能量与光的强度无关，而只与光的颜色有关，更准确地说，即只与光的频率有关。根据传统的辐射理论，这是难以理解的。爱因斯坦将普朗克的假说解释为光是由

① 海森伯这句话同历史事实不尽相符。普朗克作这种调和的尝试不止进行五年，而是进行了十多年，直到1915年他才宣告放弃他的这种尝试。那时，别的物理学家朝量子论这个“新方向迈出”已经不止是“第二步”了。——译者注

穿过空间的能量子组成的，这样，他就成功地解释了上述的观测结果。按照普朗克的假说，一个光量子的能量应当等于光的频率乘以普朗克常数。

另一个问题是固体的比热。从传统理论推导出来的比热值与高温时的观测记录相符，但在低温时就不相符了。又是爱因斯坦成功地指出，将量子假说应用到固体中原子的弹性振动上去，就可以理解这种性状。这两个结果标志了一个很重要的进展，因为它们表明，普朗克的作用量子（在物理学家中称为普朗克常数）也出现在若干与热辐射并无直接关系的现象中。同时，它们还揭示了新假说的深刻的革命性，因为第一个问题导出了与光的传统的波动图象迥然不同的描述。光既可以按照麦克斯韦的理论解释为由电磁波所组成，又可以解释为由光量子，即由以高速穿过空间的能包所组成。但是，是否两种解释都成立呢？爱因斯坦当然知道，著名的衍射和干涉现象只有根据波动图象才能解释。他不能消除这个波动图象和光量子观念之间的根本矛盾；他甚至也不企图消除这种解释的不一致性。他只是简单地把这种矛盾看作是某种大概只有在很久以后才能弄清楚的东西。

在这期间，贝克勒耳(Becquerel)、居里(Curie)和卢瑟福(Rutherford)的实验，对原子结构的问题作了某种程度的澄清。1911年，卢瑟福从他对穿过物质的 α 射线与物质的相互作用的观测，推导出他的著名的原子模型。原子被描绘为由一个原子核和一些电子所组成，原子核带正电，差不多包含了原子的全部质量，而电子环绕原子核旋转，就象行星环绕太阳旋转一样。不同元素的原子之间的化学键被解释为相邻原子的外层电子之间的相互作用；它和原子核没有直接关系。原子核通过它的电荷决定着原子的化学行为，而原子核的电荷又使中性原子的电子数目固定不变。起初，这个原子模型不能解释原子的最突出的特性，即原子的巨大稳定

性。按照牛顿的力学定律，从来没有一个行星系统在它和另一个这样的系统碰撞以后能够回复它原来的位形。但是，举例说吧，一个碳元素的原子，在化学结合过程中的任何一次碰撞和相互作用之后，都始终保持为一个碳原子。

玻尔(Bohr)在1913年利用普朗克的量子假说，对这个不平常的稳定性作出了解释。如果原子只能通过分立的能量子来改变它的能量，这必定意味着原子只能处在分立的定态之中，而最低的定态就是原子的正常态。因此，原子在各种相互作用以后，最后总是回复到它的正常态。

通过量子论在原子模型上的这种应用，玻尔不仅能够解释原子的稳定性，而且，在若干简单例子中，对原子通过放电或加热受激发后所发射的光谱线也能作出理论解释。他的理论以电子运动的经典力学和量子条件的结合为基础，这些量子条件是为了定义系统的分立定态而强加于经典运动之上的。关于这些条件的一致的数学表述是后来由索末菲(Sommerfeld)给出的。玻尔完全了解量子条件在某些方面破坏了牛顿力学的一致性这样一个事实。在氢原子的简单例子中，人们能根据玻尔的理论算出原子所发射的光的频率，并且和观察结果完全一致。然而这些频率和电子环绕原子核的轨道频率以及它们的谐频都不相同，这个事实立刻显示了玻尔的理论还充满了矛盾。但是，它包含了真理的主要部分。它定性地解释了原子的化学行为和它们的光谱线。分立定态的存在也为弗朗克(Franck)和赫兹（Hertz）、斯特恩（Stern）和革拉赫（Gerlach）的实验所证实。

玻尔的理论开辟了一条新的研究路线。光谱学在好几十年内积累起来的大量实验资料，现在可用来作为关于支配原子中电子运动的奇怪的量子定律的信息了。许多化学实验能用于同样的目的。从这个时候开始，在这方面物理学家才学会提出正确的问题；

而提出正确的问题往往等于解决了问题的大半。

这些问题是什么？实际上全部问题都涉及不同实验结果之间的奇怪的明显的矛盾。同一种辐射，它既产生干涉图样，因而它必定是由波所组成，然而它又引起光电效应，因而它必定由运动的粒子所组成，这是怎么一回事呢？原子中电子的轨道运动的频率怎么能够不在发射出的辐射的频率中显示出来？难道这意味着没有轨道运动？但是假如轨道运动的观念是不正确的，那么原子中的电子到底是怎么样的呢？人们能够看到电子通过一个云室，有时它们是从一个原子中打出来的；为什么它们不再运动到原子之中去呢？确实，在原子的正常态即最低能态中，电子或许可能是静止的。但是还有许多较高的能态，在这些态里电子壳层有一个角动量。那里的电子不可能是静止的。人们还能够举出许多类似的例子。人们一而再、再而三地发现，用物理学的传统术语来描述原子事件的企图，结果总是导致矛盾。

到二十年代的初期，物理学家们逐渐变得习惯于这些困难了，他们得到了关于麻烦会在哪里发生的某种模糊的知识，并且还学会了回避矛盾。他们知道，对于所探讨的特殊实验，关于原子事件的哪一种描述是正确的。这虽然还不足以为一个量子过程中所发生的一切构成一幅前后一致的一般图象，但它是这样地改变了物理学家们的见解，以致他们多少领会了量子论的精神。因此，甚至在人们建立起前后一致的量子论形式系统以前的相当时期，人们就已多少知道一些实验的结果将是个什么样子。

人们常常讨论到那种所谓理想实验。这样的实验是被设计来回答判决性的问题的，不管它们实际上是否能够实现。当然，重要的是原则上应当能够实现这个实验，但在技术上可能是极端复杂的。这些理想实验在澄清某些问题方面是十分有用的。如果物理学家们对某个理想实验的结果没有一致的意见，那就常常可以找

到一个与之相似但更为简单的能够实现的实验，从而使实验答案能从基本上对量子论的阐明有所贡献。

那几年有一个最奇怪的经验：在阐明过程中，量子论的佯谬并没有消失；恰恰相反，它们甚至变得更为显著，更加激动人心了。例如，康普顿（Compton）有一个关于X射线散射的实验就是这样。在以往关于散射光干涉的实验中，散射无疑地主要以下列方式发生：入射光波使得处于光束中的一个电子以光波的频率振动；然后振荡的电子发出一个同样频率的球面波，从而产生了散射光。然而康普顿在1923年发现，散射出来的X射线的频率与入射X射线的频率不同。假设散射是用光量子和一个电子的碰撞来描述的，那么，频率的这种改变在形式上是可以理解的。光量子的能量在碰撞过程中改变了；并且因为频率乘上普朗克常数应当是光量子的能量，所以频率也应当改变。但是在光波的这种解释中发生了什么呢？两个实验——一个是关于散射光的干涉，另一个是关于散射光频率的变化——看来是互相矛盾，没有任何调和的可能性的。

这时候，许多物理学家相信，这些明显的矛盾应当归入原子物理学的内在的结构。因此，1924年，法国的德布罗意（de Broglie）试图将光的波动描述方法和粒子描述方法间的二象性推广到物质的基本粒子，首先是推广到电子上去。他指出，有某种物质波云"对应"于一个运动电子，就象一个光波对应于一个运动光量子一样。那时候，在这种联系中"对应"这个词意味着什么，还是不清楚的。但是德布罗意建议，应当把玻尔理论中的量子条件解释为关于物质波的陈述。由于几何学上的理由，环绕一个核转动的波只能是一个驻波；而轨道的周长必定是波长的整数倍。德布罗意的观念就是这样地把量子条件和波粒二象性联系起来，而量子条件过去在电子力学中一直是一个外来的因素。

在玻尔的理论中，计算出来的电子轨道频率和发射出来的辐射频率间的不相符，必须解释成电子轨道的概念有其局限性。这个概念从一开始就有点值得怀疑。然而，对于较高的轨道，电子将在离核很远的地方运动，就象人们看到它们在云室中运动时的情况一样。在那里，人们应当谈到电子轨道。因此，对于这些较高的轨道，发射辐射频率接近轨道频率和它的较高的谐频，这是很令人满意的。此外，玻尔在他的早期论文中就已经提出，发射光谱线的强度接近于对应的谐波的强度。这个对应原理对近似地计算谱线强度已经证明是很有用的。这样，人们就有一个印象：玻尔的理论对原子内部发生的事情作了定性的但不是定量的描述；物质行为的若干新特征是由量子条件定性地表示的，而这些量子条件又与波粒二象性相联系。

量子论的准确的数学表述最后是从两个不同的发展方向出现的。一个从玻尔的对应原理开始。人们不得不放弃电子轨道的概念，但在高量子数的极限情况下，即对于大轨道而言，这个概念仍须保留。在后面这种情形中，发射辐射以它的频率和强度给出电子轨道的图象；这个图象代表数学家所谓的轨道的傅里叶(Fourier)展开式。这种观念自身说明了，人们不应当把力学定律写为电子的位置和速度的方程，而应当写为电子的傅里叶展开式中的频率和振幅的方程。从这样一些方程出发并稍稍改变它们，人们就能够希望得到同发射辐射频率和强度相对应的那些量之间的关系，这些关系甚至对于小轨道和原子的基态也能成立。这个计划是能够实际实现的；1925年的夏天，它引导出一个数学形式系统，称为矩阵力学，或者，更一般地称为量子力学。牛顿力学的运动方程被矩阵之间的类似方程所代替；有一个新奇的经验是：人们发现牛顿力学的许多旧结果，例如能量守恒等等，也能从新的数学方案推导出来。后来，玻恩(Born)、约尔丹(Jordan)和狄拉克(Dirac)

的研究表明，代表电子的位置和动量的矩阵是不对易的。这个事实清楚地显示了经典力学和量子力学之间的本质差别。

另一个发展方向是随着德布罗意的物质波的观念而来的。薛定谔(Schrödinger)试图建立一个关于环绕原子核的德布罗意驻波的波动方程。早在1926年，他成功地推导出氢原子各定态的能量值作为他的波动方程的"本征值"，并能给出将一套已定的经典运动方程转换成多维空间中对应的波动方程的更一般的规定。后来，他又得以证明，他建立的波动力学形式系统和较早的量子力学形式系统在数学上是等价的。

因此，人们终于有了一个前后一致的数学形式系统，它能用两种等价的方法规定下来，或者从矩阵之间的关系出发，或者从波动方程出发。这个形式系统给出了正确的氢原子能量值；不到一年，又证明它对氦原子和较重原子的更复杂问题也是成功的。但是新的形式系统是在什么样的意义上描述原子的呢？波动图象与微粒图象间二象性的佯谬尚未解决；这些佯谬不知因什么缘故而潜伏在数学方案之中。

玻尔、克拉麦斯(Kramers)、斯莱特(Slater)在1924年向真正理解量子论迈出了第一步和很有意义的一步。这几位作者试图用几率波的概念来解决波动图象和粒子图象间的明显矛盾。电磁波不被解释为"真实"的波，而被解释为几率波，几率波在每一点的强度决定该点的原子吸收(或感生发射)一个光量子的几率。这个观念引导出这样一个结论：能量和动量守恒律对单个粒子事件不一定成立，它们只是统计规律，只有取统计平均值时才成立。不过，这个结论是不正确的，而辐射的波动面貌和粒子面貌之间的联系却变得更为复杂了。

但是玻尔、克拉麦斯和斯莱特的论文揭示了量子论的正确解释的一个主要特征。几率波的概念是牛顿以来理论物理学中全新

的东西。在数学或统计力学中，几率意味着我们对实际状况认识程度的陈述。在掷骰子时，我们不知道决定骰子下落的人手运动的细节，因此我们说掷出某一个特定数字的几率正好是六分之一。然而，玻尔、克拉麦斯、斯莱特的几率波意味着更多一些东西；它意味着对某些事情的倾向。它是亚里士多德(Aristotle)哲学中“潜能”(potentia)这个老概念的定量表述。它引入了某种介于实际的事件和事件的观念之间的东西，这是正好介于可能性和实在性之间的一种新奇的物理实在。

后来，当量子论的数学框架确定了以后，玻恩采取了这个几率波的观念，并给被看作几率波的形式系统中的数学量以清楚的定义。它不是象弹性波或无线电波那样的三维波，而是在多维位形空间中的波，因而是颇为抽象的数学量。

即令在这个时候，即在1926年夏天，在各种情况下应当怎样使用数学形式系统来描述给定的实验状况，也还是没有搞清楚。人们知道怎样描写一个原子的定态，但不知道怎样描述一个简单得多的事件——例如通过云室的一个电子。

当薛定谔在那个夏天证明了他的波动力学形式系统在数学上等价于量子力学以后，他一度试图全部放弃量子和“量子跳变”的观念，并简单地用他的三维物质波来代替原子中的电子。他当时热衷于这种尝试是由于他得到了一个成果，即在他的理论中氢原子的能级似乎正好就是驻立物质波的本征频率。因此，他以为把它们叫做能量是错误的；它们只不过是频率。但在玻尔、薛定谔和哥本哈根学派的物理学家们于1926年秋在哥本哈根举行的讨论会中，很快就弄清楚，这样一种解释甚至还不足以解释普朗克的热辐射公式。

在这些讨论以后的几个月内，在哥本哈根对有关解释量子论的全部问题所作的紧张研究，正如许多物理学家所相信的那样，终

于对情况作出了全面的、令人满意的阐明。但这不是一个容易被人接受的解答。我记得有一次同玻尔讨论了几个钟头，直到深夜才几乎在绝望中结束；当讨论结束时，我独自到邻近的花园中去散步，当时我一再反复问我自己：难道自然界真能象这些原子实验给我们的印象那么荒诞无稽吗？

最后的解答是从两条不同的道路逐渐接近的。一条是改变问题的提法。代替这样一个问题："人们怎样才能够在已知的数学方案中表示出一个给定的实验状况？"提出了另一个问题："只有能在数学形式系统中表示出来的实验状况才能在自然中发生，也许这是正确的？"如果假设这实际上是正确的，结果就将对自牛顿以来成为经典力学基础的那些概念的适用范围施加限制。像在牛顿力学中那样，人们能够谈论一个电子的位置和速度，并能够观察和测量这些量。但是，人们不能以任意高的准确度同时测定这两个量。实际上已经发现，这样两个不准确度的乘积不应当小于普朗克常数除以粒子的质量。从其他实验状况也能推出类似的关系。它们通常称为测不准关系，或测不准原理。① 人们已经知道，老概念只是不准确地吻合自然。

另一条接近的道路是玻尔的互补概念。薛定谔已经不把原子描述为一个原子核和电子的系统，而把它描述为一个原子核和一些物质波的系统。这种物质波图象当然也包含一个真理的因素。玻尔把两种图象——粒子图象和波动图象——看作是同一个实在的两个互补的描述。这两个描述中的任何一个都只能是部分正确的，使用粒子概念以及波动概念都必须有所限制，否则就不能避免矛盾。如果考虑到能够以测不准关系表示的那些限制，矛盾就消失了。

这样，自从1927年春天以来，人们就有了一个量子论的前后

① 或译不确定关系或不确定原理。——译者注

一致的解释，它常常被称为“哥本哈根解释”。1927年在布鲁塞尔举行的索尔维(Solvay)会议上，这个解释接受了严峻的考验。对那些总是导致最坏的佯谬的实验全都再三地在所有细节上作了讨论，特别是爱因斯坦。人们还设想了一些新的理想实验去探索理论的任何可能的不一致性，但是这个理论被证明为前后一致的，并且对于人们所知道的一切实验，看来都是符合的。

这个哥本哈根解释的细节将是下一章的主题。应当强调指出这一点：从最初提出存在能量子的观念到真正理解量子理论的定律，已经过去了四分之一世纪以上。这表明了，在人们能够理解新情况之前，有关实在的基本概念必须发生巨大的变革。

第 三 章

量子论的哥本哈根解释

量子论的哥本哈根解释是从一个佯谬出发的。物理学中的任何实验，不管它是关于日常生活现象的，或是有关原子事件的，都是用经典物理学的术语来描述的。经典物理学的概念构成了我们描述实验装置和陈述实验结果的语言。我们不能也不应当用任何其他东西来代替这些概念。然而，这些概念的应用受到测不准关系的限制。当使用这些概念时，我们必须在心中牢记经典概念的这个有限的适用范围，但我们不能够也不应当企图去改进这些概念。

为了更好地了解这个佯谬，比较一下在经典物理学和量子论中对一个实验进行理论解释的程序是有用的。譬如，在牛顿力学中，我们要研究行星的运动，可以从测量它的位置和速度开始。只要通过观测推算出行星的一系列坐标值和动量值，就可以将观测结果翻译成数学。此后，运动方程就用来从已定时间的这些坐标和动量值推导出晚些时候系统的坐标值或任何其他性质，这样，天文学家就能够预言系统在晚些时候的性质。例如，他能够预言月蚀的准确时间。

在量子论中，程序稍有不同。例如，我们可能对云室中一个电子的运动感兴趣，并且能用某种观测决定电子的初始位置和速度。但是这个测定将不是准确的；它至少包含由于测不准关系而引起的不准确度，或许还会由于实验的困难包含更大的误差。首先正是由于这些不准确度，才容许我们将观测结果翻译成量子论

的数学方案。写出的几率函数是代表进行测量时的实验状况的，其中甚至包含了测量的可能误差。

这种几率函数代表两种东西的混合物，一部分是事实，而另一部分是我们对事实的知识。就它选定初始时间的初始状况的几率为1（即完全确定）这一点说，它代表了事实：电子在被观测到的位置以被观测到的速度运动；“被观测到”意指在实验的准确度范围内被观测到。而就另一个观测者或许能够更准确地知道电子的位置这一点说，它则代表我们的知识。实验的误差并不（至少在某种程度上）代表电子的性质，而表示了我们对电子的知识的缺陷。这种知识的缺陷也是由几率函数表示的。

在经典物理学中，当在进行精细的研究时，人们同样应当考虑到观测的误差。结果，人们就得到关于坐标和速度的初始值的几率分布，因此也就得到很类似于量子力学中的几率函数的某种东西。只是量子力学中由于测不准关系而必有的测不准性，在经典物理学中是没有的。

当量子论中的几率函数已在初始时间通过观测决定了以后，人们就能够从量子论定律计算出以后任何时间的几率函数，并能由此决定一次测量给出受测量的某一特殊值的几率。例如，我们能预测以后某一时间在云室中某一给定点发现电子的几率。应当强调指出，无论如何，几率函数本身并不代表事件在时间过程中的经过。它只代表一些事件的倾向和我们对这些事件的知识。只有当满足一个主要条件时：例如作了决定系统的某种性质的新测量时，几率函数才能和实在联系起来。只有那时，几率函数才容许我们计算新测量的可能结果。而测量结果还是用经典物理学的术语叙述的。

由此可见，对一个实验进行理论解释需要有三个明显的步骤：(1)将初始实验状况转述成一个几率函数；(2)在时间过程中追踪

这个几率函数；(3)关于对系统所作新测量的陈述，测量结果可以从几率函数推算出来。对于第一个步骤，满足测不准关系是一个必要的条件。第二步骤不能用经典概念的术语描述；这里没有关于初始观测和第二次测量之间系统所发生的事情的描述。只有到第三个步骤，我们才又从“可能”转变到“现实”。

让我们用一个简单的理想实验来演示这样三个步骤。前面已经说过，原子是由一个原子核和环绕原子核运动的电子所组成；前面也已论述过，电子轨道的概念是可疑的。人们或许会主张，至少原则上应当能够观察到轨道中的电子。人们可以简单地通过一个分辨本领非常高的显微镜来观看原子，这样就应该能看到在轨道中运动的电子。当然，使用普通光的显微镜是不能达到这样高的分辨本领的，因为位置测量的不准确度决不能小于光的波长。但是一个用波长小于原子大小的γ射线的显微镜将能做到这一点。这样的显微镜尚未被制造出来，但这不应当妨碍我们讨论这个理想实验。

第一个步骤，即将观测结果转述成一个几率函数，是可能做到的吗？只有在观测后满足测不准关系时，这才是可能的。电子的位置可以观测得这样准确，其准确度随γ射线的波长而定。在观测前电子可以说实际上是静止的。但是在观测作用过程中，至少有一个γ射线的光量子必须通过显微镜，并且必须首先被电子所偏转。因此，电子也被光量子所撞击，这就改变了它的动量和速度。人们能够证明，这种变化的测不准性正好大到足以保证测不准关系的成立。因此，关于第一个步骤，没有丝毫困难。

同时，人们能够很容易理解没有观测电子环绕原子核的轨道的方法。第二个步骤在于显示一个不绕原子核运动而是离开原子的波包，因为第一个光量子已将电子从原子中打出。如果γ射线的波长远小于原子的大小，γ射线的光量子的动量将远大于电子

的原始动量。因此，第一个光量子足以从原子中打出电子，并且人们决不能观测到电子轨道中另外的点；因此，也就没有通常意义的轨道了。下一次观测——第三个步骤——将显示电子离开原子的路线。两次相继观测之间所发生的事情，一般是完全无法描述的。当然，人们总想这样说：在两次观测之间，电子必定要处在某些地方，因而必定也描绘出某种路线或轨道，即使不可能知道是怎样一条路线。这在经典物理学中是一个合理的推论。但是，在量子论中，我们将在后面看出，这是语言的不合理的误用。我们可以暂时不去管这个警告究竟是指我们谈论原子事件的方法还是指原子事件本身，究竟它所涉及的是认识论还是本体论。但在任何情况下，我们对原子粒子的行为作任何陈述时，措辞都必须非常小心。

实际上我们完全不需要说什么粒子。对于许多实验，说物质波却更为便利；譬如，说环绕原子核的驻立物质波就更为便利。但是，如果不注意测不准关系所给出的限制，这样一种描述将和另一种描述直接矛盾。通过这些限制，矛盾就避免了。使用“物质波”是便利的，举例说，处理原子发射的辐射时就是这样。辐射以它的频率和强度提供了原子中振荡着的电荷分布的信息，因而波动图象比粒子图象更接近于真理。因此，玻尔提倡两种图象一并利用，他称它们是“互补”的。这两种图象当然是相互排斥的，因为一个东西不能同时是一个粒子(即限制于很小体积内的实体)而又是一个波(即扩展到一个大空间的场)，但二者却互相补充。摆弄这两种图象，从一种图象转到另一种图象，然后又从另一种图象转回到原来的图象，我们最终得到了隐藏在我们的原子实验后面的奇怪的实在的正确印象。玻尔在量子论解释的好几个地方使用了“互补性”概念。关于粒子位置的知识是和关于它的速度或动量的知识互补的。如果我们以高度的准确性知道了其中一个，我们就不能以高度的准确性知道另一个；但为了决定系统的行为，我们仍须

两个都知道。原子事件的空间时间描述是和它们的决定论描述互补的。几率函数服从一个运动方程，就象坐标在牛顿力学中那样；它随时间的变化是被量子力学方程完全决定了的，但它不容许对原子事件在空间和时间中进行描述。另一方面，观测要求在空间和时间中对系统进行描述，但是，由于观测改变了我们对系统的知识，它也就破坏了几率函数的已定的连续性。

一般地讲，关于同一实在的两种不同描述之间的二象性已不再是一个困难了，因为我们已经从量子论的数学形式系统得知，矛盾是不能产生的。两种互补图象——波和粒子——间的二象性也很清楚地表现在数学方案的灵活性中。数学形式系统通常是仿照牛顿力学中关于粒子的坐标和动量的运动方程写出的。但通过简单的变换，就能把它改写成类似于关于普通三维物质波的波动方程。因此，摆弄不同的互补图象的这种可能性类似于数学方案的不同变换；它并不给量子论的哥本哈根解释带来任何困难。

然而，当人们提出了这样一个著名的问题："但是在原子事件中'真正'发生了什么呢？"这时，了解这种解释的真正困难就产生了。前面说过，一次观测的机构和结果总是能用经典概念的术语来陈述的。但是，人们从一次观测推导出来的是一个几率函数，它是把关于可能性（或倾向）的陈述和关于我们对事实的知识的陈述结合起来的一种数学表示式。所以我们不能够将一次观测结果完全客观化，我们不能描述这一次和下一次观测间"发生"的事情。这看来就象我们已把一个主观论因素引入了这个理论，就象我们想说：所发生的事情依赖于我们观测它的方法，或者依赖于我们观测它这个事实。在讨论这个主观论的问题之前，必须完全解释清楚，为什么当一个人试图描述两次相继进行的观测之间所发生的事情时，他会陷入毫无希望的困难。

为此目的，讨论下述理想实验是有好处的：我们假设一个小的

单色光源向一个带有两个小孔的黑屏辐射。孔的直径不可以比光的波长大得太多，但它们之间的距离远远大于光的波长。在屏后某个距离有一张照像底片记录了入射光。如果人们用波动图象描述这个实验，人们就会说，初始波穿过两个孔；将有次级球面波从小孔出发并互相干涉，而干涉将在照像底片上产生一个强度有变化的图样。

照像底片的变黑是一个量子过程，化学反应是由单个光量子所引起的。因此，用光量子来描述实验必定也是可能的。如果容许讨论单个光量子在它从光源发射和被照像底片吸收之间所发生的事情的话，人们就可以作出如下的推论：单个光量子能够通过第一个小孔或通过第二个小孔。如果它通过第一个小孔并在那里被散射，它在照像底片某点上被吸收的几率就不依赖于第二个孔是关着或开着。底片上的几率分布就应当同只有第一个孔开着的情况一样。如果实验重复多次，把光量子穿过第一个小孔的全部情况集中起来，底片由于这些情况而变黑的部分将对应于这个几率分布。如果只考虑通过第二个小孔的那些光量子，变黑部分将对应于从只有第二个小孔是开着的假设推导出来的几率函数。因此，整个变黑部分将正好是两种情况下变黑部分的总和；换句话说，不应该有干涉图样。但是我们知道，这是不正确的，因为这个实验必定会出现干涉图样。由此可见，说任一光量子如不通过第一个小孔就必定通过第二个小孔，这种说法是有问题的，并且会导致矛盾。这个例子清楚地表明，几率函数的概念不容许描述两次观测之间所发生的事情。任何寻求这样一种描述的企图都将导致矛盾；这必定意味着“发生”一词仅限于观测。

这确是一个非常奇怪的结果，因为它们似乎表明，观测在事件中起着决定性作用，并且实在因为我们是否观测它而有所不同。为了更清楚地表明这一点，我们必须更仔细地分析观测过程。

首先，记住这一点是重要的：在自然科学中，我们并不对包括我们自己在内的整个宇宙感到兴趣，我们只注意宇宙的某一部分，并将它作为我们研究的对象。在原子物理学中，这一部分通常是一个很小的对象，一个原子粒子或是一群这样的粒子，有时也可能要大得多——大小是不关紧要的；但是，重要的是，包括我们在内的大部分宇宙并不属于这个对象。

现在，从已经讨论过的两个步骤开始对实验作理论的解释。第一步，我们必须用经典物理学的术语来描述最后要和第一次观测相结合的实验装置，并将这种描述转译成几率函数。这个几率函数服从量子论的定律，并且它在连续的时间过程中的变化能从初始条件计算出来；这是第二步。几率函数结合了客观与主观的因素。它包含了关于可能性或较大的倾向（亚里士多德哲学中的“潜能”）的陈述，而这些陈述是完全客观的，它们并不依赖于任何观测者；同时，它也包含了关于我们对系统的知识的陈述；这当然是主观的，因为它们对不同的观测者就可能有所不同。在理想的情形中，几率函数中的主观因素当与客观因素相比较时，实际上可以被忽略掉。这时，物理学家就称它为“纯粹情态”。

现在，当我们作第二次观测时，它的结果应当从理论预言出来；认识到这一点是十分重要的，即我们的研究对象在观测前或至少在观测的一瞬间必须和世界的另一部份相接触，这世界的另一部份就是实验装置、量尺等等。这表示几率函数的运动方程现在包含了与测量仪器的相互作用的影响。这种影响引入一种新的测不准的因素，因为测量仪器是必须用经典物理学的术语描述的；这样一种描述包含了有关仪器的微观结构的测不准性，这是我们从热力学认识到的；然而，因为仪器又和世界的其余部份相联系，它事实上还包含了整个世界的微观结构的测不准性。从这些测不准性仅仅是用经典物理学术语描述的后果而并不依赖于任何观察者

这一点说，它们可以称为客观的。而从这些测不准性涉及我们对于世界的不完全的知识这一点说，它们又可以称为主观的。

在发生了这种相互作用之后，几率函数包含了倾向这一客观因素和知识的不完整性这一主观因素，即令它以前曾经是一个“纯粹情态”，也还是如此。正是由于这个原因，观测结果一般不能准确地预料到；能够预料的只是得到某种观察结果的几率，而关于这种几率的陈述能够以重复多次的实验来加以验证。几率函数不描述一个确定事件（即不象牛顿力学中那种正常的处理方法），而是种种可能事件的整个系综，至少在观测的过程中是如此。

观测本身不连续地改变了几率函数；它从所有可能的事件中选出了实际发生的事件。因为通过观测，我们对系统的知识已经不连续地改变了，它的数学表示也经受了不连续的变化，我们称这为“量子跳变”。当一句古老的谚语“自然不作突变”被用来作为批评量子论的根据时，我们可以回答说：我们的知识无疑是能够突然地变化的，而这个事实证明使用“量子跳变”这个术语是正确的。

因此，在观测作用过程中，发生了从“可能”到“现实”的转变。如果我们想描述一个原子事件中发生了什么，我们必须认识到，“发生”一词只能应用于观测，而不能应用于两次观测之间的事态。它只适用于观测的物理行为，而不适用于观测的心理行为，而我们可以说，只有当对象与测量仪器从而也与世界的其余部分发生了相互作用时，从“可能”到“现实”的转变才会发生；它与观测者用心智来记录结果的行为是没有联系的。然而，几率函数中的不连续变化是与记录的行为一同发生的，因为正是在记录的一瞬间我们知识的不连续变化在几率函数的不连续变化中有了它的映象。

那么，我们对世界，特别是原子世界的客观描述最终能达到什么样的程度呢？在经典物理学中，科学是从信仰开始的——或者人们应该说是从幻想开始的？——这就是相信我们能够描述世

界，或者至少能够描述世界的某些部分，而丝毫不用牵涉到我们自己。这在很大程度上是实际可能做到的。我们知道伦敦这个城市存在着，不管我们看到它与否。可以说，经典物理学正是那种理想化情形，在这种理想化情形中我们能够谈论世界的某些部分，而丝毫不涉及我们自己。它的成功把对世界的客观描述引导到普遍的理想化。客观性变成评定任何科学结果的价值时的首要标准。量子论的哥本哈根解释仍然同意这种理想化吗？人们或许会说，量子论是尽可能地与这种理想化相一致的。的确，量子论并不包含真正的主观特征，它并不引进物理学家的精神作为原子事件的一部分。但是，量子论的出发点是将世界区分为"研究对象"和世界的其余部分，此外，它还从这样一个事实出发，这就是至少对于世界的其余部分，我们在我们的描述中使用的是经典概念。这种区分是任意的，并且从历史上看来，是我们的科学方法的直接后果；而经典概念的应用终究是一般人类思想方法的后果。但这已涉及我们自己，这样，我们的描述就不是完全客观的了。

在开始时已说过，量子论的哥本哈根解释是从一个佯谬开始的。它从我们用经典物理学术语描述我们的实验这样一个事实出发，同时又从这些概念并不准确地适应自然这样一个认识出发。这样两个出发点间的对立关系，是量子论的统计特性的根源。因此，不时有人建议，应当统统摒弃经典概念，并且由于用来描述实验的概念的根本变化，或许可能使人们回到对自然界作非静态的、完全客观的描述。

然而，这个建议是立足于一种误解之上的。经典物理学概念正是日常生活概念的提炼，并且是构成全部自然科学的基础的语言中的一个主要部分。在科学中，我们的实际状况正是这样的，我们确实使用了经典概念来描述实验，而量子论的问题是在这种基础上来找出实验的理论解释。讨论假如我们不是现在这样的人，

我们能做些什么这样的问题，是没有用处的。在这一点上，我们必须认识到，正如冯·威扎克尔(Von Weizsäcker)所指出的，“自然比人类更早，而人类比自然科学更早。”这两句话的前一句证明了经典物理学是具有完全客观性的典型。后一句告诉我们，为什么不能避免量子论的佯谬，即指出了使用经典概念的必要性。

我们必须在原子事件的量子理论解释中给实际程序加上若干注释。已经说过，我们的出发点总是把世界区分为我们将进行研究的对象和世界的其余部分，并且这种区分在某种程度上是任意的。举例说吧，如果我们将测量仪器的某些部分或是整个仪器加到对象上去，并对这个更复杂的对象应用量子论定律，在最终结果上确实不应有任何差别。能够证明，理论处理方法这样的一种改变不会改变对已定实验的预测。在数学上这是由于这样一个事实，就是对于能把普朗克常数看作是极小的量的那些现象，量子论的定律近似地等价于经典定律。但如果相信将量子理论定律对测量仪器这样应用时，能够帮助我们避免量子论中的基本佯谬，那就错了。

只有当测量仪器与世界的其余部分密切接触时，只有当在仪器和观测者之间有相互作用时，测量仪器才是名符其实的。因此，就象在第一种解释中一样，这里关于世界的微观行为的测不准性也将进入量子理论系统。如果测量仪器与世界的其余部分隔离开来，它就既不是一个测量仪器，也就根本不能用经典物理学的术语来描述了。

关于这种状况，玻尔曾强调指出，对象和世界其余部分的区分不是任意的这种讲法是更为现实些。在原子物理学中，我们的研究工作的实际状况通常是这样的：我们希望了解某种现象，我们希望认识这些现象是如何从一些普遍的自然规律中推导出来的。由此可见，参与现象的一部分物质或辐射是理论处理中的当然的“对

象”,并且在这方面,它们应当和用来研究现象的工具分离开来。这又使得原子事件描述中的主观因素突出出来,因为测量仪器是由观测者创造出来的,而我们必须记得,我们所观测的不是自然的本身,而是由我们用来探索问题的方法所揭示的自然。在物理学中,我们的科学工作在于用我们所掌握的语言来提出有关自然的问题,并且试图从我们随意部署的实验得到答案。正如玻尔所表明的,这样,量子论就使我们想起一个古老的格言、当寻找生活中的和谐时,人们决不应当忘记,在生活的戏剧中,我们自己既是演员,又是观众。可以理解,在我们与自然的科学关系中,当我们必须处理只有用最精巧的工具才能深入进去的那部分自然时,我们本身的活动就变得很重要了。

第 四 章

量子论和原子科学的渊源

原子的概念比十七世纪现代科学的开端要早得多；它起源于古希腊的哲学，在希腊哲学初期，它还是留基伯(Leucippus)和德谟克利特(Democritus)所传授的唯物主义的中心概念。另一方面，原子事件的现代解释和真正的唯物主义哲学已很少类似之处；事实上，人们可以说原子物理学已经使科学离开了它在十九世纪所具有的唯物主义倾向。因此，将希腊哲学向原子概念的发展同这一概念现在在现代物理学中的地位作一比较，是颇有趣味的。

首次提出物质的最小的、不可分割的、最终的单位的观念，是和作为希腊哲学初期的标志的关于**物质**、**存在**和**生成**等概念的刻苦钻研相联系的。这时期开始于公元前六世纪，首先是由米利都学派的创始人泰勒斯(Thales)开端的，亚里士多德认为"水是万物的质料因"这个命题就是泰勒斯首创的。这个命题，虽然在我们看来感到很奇怪，但却如尼采(Nietzsche)所指出，表达了哲学的三个基本观念。第一，提出万物的质料因问题；第二，要求对这个问题作出合理的回答，而不求助于神话和神秘主义；第三，假设最终必能把万物还原于一个本原。泰勒斯的命题是关于基本实体观念的第一个表述，他认为所有其他东西都是基本实体的暂时形式。在那个时代所说"实体"一词，当然不是单纯在质料的意义上解释的，如我们今天常常描述它的那样。当时，生命被认为是与这种"实体"相联系或者是这种"实体"所固有的，并且，亚里士多德认为"万物都充满着神"这一命题也是泰勒斯提出的。但是，泰勒斯还

是提出了万物的质料因这样一个问题，并且不难设想，他最初是从气象学的考察形成他的观点的。我们知道，在万物之中，水能够取多种多样的形状：它在冬天能取冰和雪的形式，它能变为蒸汽，它能形成云雾。在河流形成三角洲的地方水似乎转化成为土地，水也能从土地中喷出。水是生命的条件。由此可见，假如说有那么一种基本实体，很自然地会首先想到水。

基本实体的观念后来又为阿那克西曼德（Anaximander）进一步发展了，他是泰勒斯的学生，他们生活在同一个城市中。阿那克西曼德否认基本实体是水或者是任何其他已知的实体。他教导说，原始实体是无限的、永恒的和不灭的，它包含着整个世界。这种原始实体转化成为各种各样我们熟悉的实体。德奥弗拉斯特（Theophrastus）引用了阿那克西曼德的一段话："万物所由之而生的东西，万物又消灭而复归于它，这是命运规定了的，因为万物按照时间的秩序，为它们彼此间的不正义而互相补偿。"在这种哲学中，**存在**与**生成**的对立起着基本的作用。原始实体，即无限和永恒的、不能分割的**存在**，退化成为多种多样的形式，这些形式导致无穷无尽的斗争。**生成**的过程被看作是无限的**存在**的一种贬质——即分离成为对立，这种对立又因复归到无形无性的那种东西而最后得到补偿。这里所指的对立是热和冷、火和水、湿和干等对立面。其中一方对另一方的暂时胜利就是不正义，为此，它们最后将按照时间的秩序作出补偿。按照阿那克西曼德的见解，存在着"永恒的运动"，有无穷个世界从无限中产生，又消灭复归于无限。

在这里指出这一点可能是有意思的，"原始实体能不能是一种已知的实体或者它必须是某种本质上不同的东西？"这个问题在原子物理学的最新部门中也以稍微不同的形式发生了。现今，物理学家企图发现一个物质的基本运动定律，使得所有基本粒子和它们的性质都能用数学方法从这个定律推导出来。这个基本运动

方程或许与一种已知类型的波有关，例如和质子和介子波有关，或许与一种本质上不同性质的波有关，这种波与任何已知的波或基本粒子都毫无关系。第一种情形意味着所有其他基本粒子都能用某种方法还原为少数几种“最基本的”基本粒子；实际上在过去的二十年中，理论物理学主要遵循了这条研究路线。在第二个情形中，所有不同的基本粒子，都能够还原为某种我们可以称作能量或者物质的普遍实体，但基本粒子中的任何一个都不能比其他的更为“基本”。当然，后一见解与阿那克西曼德的学说更为一致，我相信，在现代物理学中这种见解是正确的。但现在还是让我们继续讨论希腊哲学吧。

米利都学派的第三个哲学家，阿那克西曼德的朋友阿那克西米尼(Anaximenes)教导说，空气是原始实体。“正如我们的灵魂是空气，并且是通过灵魂使我们结成一体一样，嘘气和空气也包围着整个世界。”阿那克西米尼在米利都哲学中引入了凝聚和稀散过程是原始实体变化为其他实体的原因的观念。水蒸汽凝聚为云被看作是一个明显的例子，当然，空气和水蒸汽的差别在那时候还是不知道的。

在爱非斯的赫拉克利特(Heraclitus)的哲学中，**生成**的概念占有头等的地位。他认为运动着的火是基本的元素。他认为对立面的斗争正是一种和谐，从而解决了将一个基本的本原的观念与现象的无限多样性相协调的困难。对于赫拉克利特，世界同时是一和多，正是各个对立面的“对立关系”构成了**一**的统一性。他说：“应当知道，战争对一切都是共同的，斗争就是正义，一切都是通过斗争而产生和消灭的。”

将希腊哲学的发展回顾到这里，人们认识到，从开始到这个阶段，它都被**一**与**多**之间的对立关系所推动。对于我们的感觉，世界是由物、事件、颜色、声音的无限多样性所构成的。但是为了了解

它，我们必须引入某种秩序，而秩序意味着去认识什么是相等的，它意味着某种统一性。由此产生了有一个基本的本原的信仰，而同时也产生了从它导出万物的无限多样性的困难。因为世界是由物质组成的，所以，万物应当有一个质料因的观点是理所当然的出发点。但当人们把基本统一性的观念推到极端，人们就到达无限的和永恒的不可分割的**存在**，它不管是不是质料的，都不能以它本身解释万物的无限多样性。这就导致**存在**和**生成**的对立，并最终导致赫拉克利特的解答：变化本身是基本的本原；正如诗人们颂赞它的："不朽的变化啊，你革新了世界。"但是变化本身并不是一个质料因，因而在赫拉克利特的哲学中用火来代表它，把它当作一个基本元素，它既是物质，又是一种动力。

在这里我们可以看到，现代物理学在某些方面非常接近赫拉克利特的学说。如果我们用"能量"一词来替换"火"一词，我们差不多就能用我们现在的观点一字不差地来重述他的命题。**能量**实际上是构成所有基本粒子、所有原子，从而也是万物的实体，而能量就是运动之物。能量是一种实体，因为它的总量是不变的，并且在许多产生基本粒子的实验中可以看到，基本粒子能够实际上用这种实体制成。能量能够转变为运动、热、光和张力。能量可以称为世界上一切变化的基本原因。但是希腊哲学和现代科学观念的这种对比将在后面讨论。

在生活在南意大利的爱利亚的巴门尼德(Parmenides)的教义中，希腊哲学又暂时回到了**一**的概念。他对希腊思想的最重要的贡献或许是他将纯逻辑推理引入了形而上学。"你不能知道什么是非存在——那是不可能的，——你也不能说出它来；因为能够思维的和能够存在的乃是同一回事。"由此可见，只有**一**存在，没有生成，没有消亡。巴门尼德根据逻辑推理否认虚空的存在。又因为如他所假定，一切变化都需要虚空，所以他否定了变化，把变化

看作是幻觉。

但是哲学不能长久依靠在这种悖论之上。来自西西里南岸的恩培多克勒(Empedocles)第一次从一元论转向某种多元论。为了避免一种原始实体不能解释事物的多样性的困难，他假设有四种基本元素：土、水、空气和火。这几种元素由于**爱**和**恨**的作用而相互混合和分离。这样，**爱**和**恨**是永恒变化的原因，在许多方面可象其他四种元素一样看作是有形体的。恩培多克勒以下列图象描述世界的构造：第一，有一个**一**的无限**球体**，如巴门尼德的哲学中一样。但在原始实体中，所有四种“根源”都被**爱**混合在一起。然后，当**爱**消失，而**恨**进入时，这些元素有部分分离了，有部分结合了。此后，这些元素全部分离了，**爱**也就在世界之外了。最后，爱又将元素集合在一起，而**恨**又消失了，这样我们又回到原始的**球体**。

恩培多克勒的这个学说代表着希腊哲学中转向更为唯物主义的观点的一种肯定的倾向。四种元素与其说是基本的本原，不如说是真实的物质实体。这里第一次表达了这样的观念，就是少数基本不同的实体的混合与分离，解释了事物的无限多样性。多元论从不求助于那些习惯于用基本的本原的概念来思考的人。但它是一种合理的妥协，它避免了一元论的困难，而又容许建立某种秩序。

走向原子概念的第二步是由阿那克萨哥拉(Anaxagoras)迈出的，他是恩培多克勒的同时代的人。他在雅典差不多生活了三十年；大约在公元前五世纪的前半期。阿那克萨哥拉强调混合物的观念，强调一切变化是起因于混合与分离的假设。他假设组成万物的无限小的“种子”的无限多样性。这种种子与恩培多克勒的四种元素无关，有不计其数的不同种子。但是种子被相互混合然后又被分离开来，就这样实现了一切变化。阿那克萨哥拉的学说第一次容许对“混合物”一词作出几何学的解释：因为他说到无限小的

种子，它们的混合物可以描绘为就象两类颜色不同的沙子的混合物。种子的数目和相对位置可以变化。阿那克萨哥拉假设在每一物中都包含了所有的种子，只是不同的物中种子的比例有所不同。他说："万物都在每个物中；也不能使它们分离，但万物有每个物的一部分。"阿那克萨哥拉的宇宙不是由于**爱**和**恨**而开始运动的，如恩培多克勒所主张的那样，而是由"奴斯"(nous)推动的，这个字我们可译为"**精神**"(mind)。

从这个哲学到原子概念只有一步之遥了，而这一步是由留基伯和阿布德拉的德谟克利特同时迈出的。巴门尼德哲学中**存在**与**非存在**的对立这里改换为"**充满**"与"**虚空**"的对立。**存在**不只是一，它能够重复无限次。这就是原子，物质的不可分割的最小单位。原子是永恒的和不灭的，但它有一定的大小。运动只能在原子之间的虚空中进行。这样就在历史上首次宣告了有最小的、最终的粒子存在的观念。这种粒子我们称为基本粒子，是物质的基本建筑基石。

按照这种新的原子概念，物质并不仅仅由"**充满**"所组成，还由"**虚空**"，由原子在其中运动的虚空所组成。巴门尼德对**虚空**的逻辑否定"非存在不能存在"，只是忽略了去和经验相适应。从我们现代的观点看来，我们说德谟克利特哲学中原子间的虚空不是无；它是几何学和运动学的负荷者，它使得原子的各种排列与运动成为可能。但是虚空的可能性永远是哲学的一个争论问题。在广义相对论中，所给的答案是几何学由物质产生，或者物质由几何学产生。这个答案更密切地符合许多哲学家的观点，即空间是由物质的广延所规定。但德谟克利特显然背离了这种观点，才使得变化与运动成为可能。

德谟克利特的原子全都是具有存在特性的相同的实体，但有不同的大小和不同的形状。因此，它们被描绘为在数学意义上是

可分的，而在物理意义上是不可分的。原子能够运动并能占有空间中的不同位置。但它们没有其他的物理性质。它们既无颜色，又无嗅味，也无滋味。我们的感觉器官所感知的物质的性质，被设想为由原子在空间中的位置和运动所引起。正象悲剧和喜剧都能用同一种字母的文字写出一样，这个世界中事件的巨大多样性也能由同样的原子通过它们的不同排列和运动而实现。几何学与运动学，是虚空才使得它们成为可能的，它们在某些方面显得比纯粹的存在更为重要。曾有人引证德谟克利特的话："物仅仅显现出有颜色，仅仅显现出是甜还是苦。只有原子和虚空才是真实的存在。"

在留基伯的哲学中，原子并不仅是由于偶然的机缘而运动。看来留基伯相信完全的决定论，因为我们知道他曾说过："没有什么是可以无端发生的，万物都是有理由的，而且都是必然的。"原子论者对原子的原始运动并没有讲出任何理由，这恰恰表明他们考虑到了原子运动的因果描述；因果性只能以早先的事件来解释以后的事件，但它决不能解释开端。

原子论的基本观念为以后的希腊哲学所接受并作了部分修改。为了与现代原子物理学作比较，谈一谈柏拉图(Plato)在他的对话《蒂迈欧篇》(*Timaeus*)中所作的关于物质的解释是重要的。柏拉图不是原子论者，相反，第欧根尼·拉尔修(Diogenes Laertius)曾介绍说，柏拉图嫌恶德谟克利特到这样的程度，以致他甚至希望烧毁德谟克利特的全部著作。但是，柏拉图把接近原子论的观念与毕达哥拉斯(Pythagoras)学派的学说和恩培多克勒的教义结合起来。

毕达哥拉斯学派是神秘主义的一个支派，它起源于酒神的礼拜仪式。这里早已建立了宗教与数学的联系，而数学从那时以来，已对人类思想发生了最强烈的影响。毕达哥拉斯派似乎最早认识

到数学形式化所固有的创造力。他们发现，如果两条弦的长度成简单的比例，它们将发出谐音，这个发现表明，数学对理解自然现象能有多么大的意义。对于毕达哥拉斯派，这甚至不是一个理解的问题。在他们看来，弦的长度间的简单的数学比例创造了声音的谐和。在毕达哥拉斯学派的学说中还包含许多我们难以理解的神秘主义。但是，由于他们把数学当作他们的宗教的一部分，他们接触到人类思想发展中的一个主要点。这里我可以引伯特兰·罗素(Bertrand Russell)关于毕达哥拉斯的一句话："我不知道还有什么别人对于思想界有过象他那么大的影响。"

柏拉图知道毕达哥拉斯派所完成的关于正多面体的发现以及将它们与恩培多克勒的四个元素结合的可能性。他将元素土的最小部分与立方体相比，元素空气的最小部分与八面体相比，元素火的最小部分与四面体相比，元素水的最小部分与二十面体相比。没有元素相当于十二面体；这里柏拉图只是说："神用以勾划宇宙的还有第五种结合方式。"

如果代表四种元素的正多面体确能和原子相比较的话，柏拉图已弄清它们不是不可分割的。柏拉图用两种基本的三角形——等边三角形和等腰三角形——构成了正多面体，这些三角形彼此连接而构成多面体的表面。因此，元素能够(至少部分地)相互转换。正多面体可以拆成一些组成它们的三角形，并由这些三角形构成新的正多面体。例如，一个四面体和两个八面体能够拆成二十个等边三角形，它们又能重新结合成一个二十面体。这意味着：一个火原子和两个空气原子能够结合而得出一个水原子。但是基本三角形不能看作是物质，因为它们在空间中没有广延。只有当把一些三角形放在一起构成一个正多面体，才产生出一个物质单位。物质的最小单位不是德谟克利特的哲学中那种基本的存在，而是数学的形式。这里十分明显，形式比以它为形式的实体更重要。

在这样简要地考察了希腊哲学直到原子概念的形成之后，我们可以回到现代物理学，并提出一个问题：我们关于原子和量子论的现代观点如何同这种古代的发展相比较？历史上，在十七世纪的科学复兴时代，现代物理学和化学中的“原子”一词被用在错误的对象上，因为一个称为化学元素的最小粒子仍然是由一些更小单位组成的颇为复杂的系统。这些更小的单位现今称为基本粒子，显然，如果现代物理学中有某种东西可与德谟克利特的原子相比较的话，这应当是象质子、中子、电子、介子那样的基本粒子。

德谟克利特很了解这样一个事实：如果说原子能够以它们的运动和排列来解释物质的性质——颜色、嗅味、滋味，那么，它们本身则不能具有这些性质。因此，他把这些性质从原子身上去掉，这样，他的原子是物质的更为抽象的部分。但是，德谟克利特给原子保留了“存在”的性质，即在空间中广延的性质，形状和运动的性质。他之所以保留这些性质，是由于如果这样一些性质也被去掉的话，归根到底就很难谈论原子了。另一方面，这也暗示了他的原子概念不能解释几何学、空间中的广延或存在，因为不能将它们简化为某种更基本的东西。考虑到这一点，基本粒子的现代观点似乎更为前后一致和更为彻底。让我们来讨论这样一个问题：什么是基本粒子？我们简单地回答，譬如说，“中子是基本粒子”，但我们不能给“中子”一幅确切的图象，并且说明我们用这个词表示了什么。我们能够使用几幅图象，有时把它描述为一个粒子，有时又描述为波或波包。但我们知道这些描述没有一个是准确的。当然，中子没有颜色，没有嗅味，没有滋味。在这方面，它与希腊哲学的原子相类似。但是，甚至还有其他一些性质也至少在某种程度上从基本粒子身上去掉了；几何学和运动学的概念，例如形状或空间中的运动，已不能够前后一致地对它加以应用了。如果人们希望对基本粒子作准确的描述——这里着重点是在“准确”一词上，

那么，唯一能写下作为描述的东西是一个几率函数。但是，在另一方面，人们看到，甚至存在的性质（如果那可以称为“性质”的话）也不属于被描述的东西了。它是存在的一种可能性，或者存在的一种倾向。由此可见，现代物理学的基本粒子比希腊人的原子更为抽象，并且它正是由于这个性质，才能够更前后一致地作为解释物质行为的线索。

在德谟克利特的哲学中，所有原子均由同样的实体组成，如果“实体”一词一定要在这里应用的话。现代物理学中的基本粒子同样是在受限制的意义上具有质量，就同它们在受限制的意义上还具有其他的性质一样。因为根据相对论，质量和能量本质上是相同的概念，所以我们可以说，所有基本粒子都由能量组成。把能量定义为世界的原始实体，就能解释这一点了。确实，它仍包含属于“实体”这个术语的主要性质，那就是它是守恒的。因此，前面已经说过，现代物理学的观点在这方面非常接近于赫拉克利特的观点，如果人们把他的元素火理解为能量的话。能量事实上就是运动之物；它可以称为一切变化的原始原因，并且能量能够转化为物质、热或光。赫拉克利特哲学中的对立面的斗争能够在不同形式的能量之间的斗争中发现。

在德谟克利特的哲学中，原子是物质的永恒的、不可毁灭的单位，它们决不能相互转化。关于这个问题，现代物理学采取了明确地反对德谟克利特的唯物主义而支持柏拉图和毕达哥拉斯的立场。基本粒子的确不是永恒的、不可毁灭的物质单位，它们实际上能够相互转化。事实上，如果两个这样的粒子以很高的动能在空间中运动，并且互相碰撞，那么，从有效能量可以产生许多新的基本粒子，而原来的两个粒子可以在碰撞中消失。这样的事件常常被观察到，并为所有的粒子均由同一种实体——“能量”——制成的论断提供了最好的证据。但是，现代观点和柏拉图与毕达哥拉

斯的观点的类似性还多少能进一步发展。柏拉图的《蒂迈欧篇》中的基本粒子最终不是实体，而是数学形式。“万物皆数”，这是毕达哥拉斯的名言。那时唯一应用的数学形式是这样一些几何形式，例如正多面体或构成它们表面的三角形。在现代量子论中，无疑地，基本粒子最后也还是数学形式，但具有更为复杂的性质。希腊哲学家想到的是静态的形式，并想象它们取正多面体形式。然而，现代科学从十六和十七世纪开创时期起，就是从动力学问题出发的。自牛顿以来，物理学中的恒定因素不是位形，或者几何形状，而是动力学定律。运动方程在任何时候都成立，它在这个意义上是永恒的，而几何形状，例如轨道，却是不断变化的。由此可见，代表基本粒子的一些数学形式将是某种永恒的物质运动律的一些解。实际上这是一个尚未解决的问题。物质的基本运动律还不知道，因此还不能用数学方法从这样一个定律推导出基本粒子的性质。但是处于目前状态的理论物理学似乎距离这个目的已不很遥远了，我们至少能够说，我们必须预期得到怎样一类定律。最终的物质运动方程或许是某种关于算符的波场的量子化非线性波动方程，这里波场仅仅代表物质，而不代表任何特种类型的波或粒子。这个波动方程或许和一些相当复杂的积分方程组等价，这些积分方程具有物理学家所称的“**本征值**”和“**本征解**”。这些**本征解**最后将代表基本粒子；它们是将要代替毕达哥拉斯的正多面体的数学形式。我们可以在这里指出，这些“**本征解**”将从物质的基本方程推出，所用的数学方法与从弦的微分方程推出毕达哥拉斯弦的谐振动的方法是十分类同的。但是，前面已指出，这些问题尚未解决。

如果我们追随毕达哥拉斯的思路，我们可以希望基本的运动律最后将是一个数学上很简单的定律，即使对各**本征态**求值的计算可以是很复杂的。关于这种对简单性的期望，难以举出任何充

分的论据——除了这样一个事实：即迄今为止，总是能够以简单的数学形式写下物理学中的基本方程。这个事实与毕达哥拉斯的宗教相符合，而许多物理学家在这方面也具有同样的信仰，但还没有一个令人信服的论据足以证明它必然如此。

在这里我们可以对普通人常常提出的关于现代物理学中基本粒子概念的问题，再发一点议论。这个问题是：为什么物理学家主张他们的基本粒子不能分成更小的部分？这个问题的答案清楚地表明，现代科学比起希腊哲学来要更为抽象到什么程度。论证过程如下：人们怎样才能分裂一个基本粒子？当然只有利用极强的力和非常锐利的工具。唯一适用的工具是其他基本粒子。可见，两个非常高能的基本粒子间的碰撞是能夠实际分裂粒子的唯一过程。实际上，它们在这样的过程中能够被分裂，有时分成许多碎片；但碎片仍然是基本粒子，而不是它们的任何更小的部分，这些碎片的质量是由两个相碰粒子的非常巨大的动能产生的。换句话说，能量转换成为物质，使得基本粒子的碎片仍然能够是同样的基本粒子。

在将原子物理学中的现代观点和希腊哲学作了类比之后，我们必须补充一个警告，即对这种类比不应有所误解。乍看起来，似乎希腊哲学家由于某种天才直觉而得到了与我们现代相同或很相似的结论，而我们的结论却是经过几个世纪的实验和数学方面的艰苦劳动才得到的。对我们的类比的这种解释无论如何是一种完全的误解。在现代科学和希腊哲学之间有着巨大的差别，那就是现代科学的经验主义态度。自从伽利略(Galileo)和牛顿的时代以来，现代科学就已奠基于对自然的详细研究之上，奠基于这样一个假设之上，这就是：只有已被实验证实的或至少能被实验证实的陈述才是容许作出的。为了研究细节并在连续不断的变化中找到经久不变的定律，人们可用一个实验在自然中隔离出若干事件，这种

观念希腊哲学家是没有想到过的。由此可见，现代科学在一开始就立足于一个比古代哲学更谨慎同时也更巩固得多的基础之上。因此，现代物理学的陈述在某种意义上比希腊哲学更严肃得多。譬如，当柏拉图说火的最小微粒是四面体时，人们很不容易了解什么是他的真实意思。是不是四面体的形式仅仅象符号一样附加在元素火的上面的？还是火的最小微粒的力学行为就象一个刚性四面体或一个弹性四面体那样呢？用什么力才能够将它们分成一些等边三角形呢？还有一些诸如此类的问题。现代科学到最后总要问：人们怎样能从实验上肯定火的原子是四面体而不是立方体？因此，当现代科学说质子是基本物质方程的某个解时，这意味着我们能从这个解用数学方法推导出质子的全部可能性质，并且能用实验从每个细节上验证这个解的正确性。以很高的准确度并在任意数量的细节上用实验验证一个陈述的正确性的这种可能性，给这个陈述以古希腊哲学的陈述所不能具有的巨大份量。

尽管如此，古代哲学的若干陈述还是颇接近于现代科学的那些陈述。这只是表明，将我们未曾做过实验就具有的关于自然的日常经验，同在这种经验中寻求某种逻辑秩序以便根据普遍原理来理解这种经验的不懈努力相结合，人们能够到达怎样的境地。

第 五 章

自笛卡儿以来哲学观念的发展和量子论的新形势的比较

在公元前四、五世纪希腊科学文化全盛时期后的两千年内，与早期那些问题不同类型的一些问题在很大程度上占据了人类的心灵。在希腊文化的头几个世纪，最强大的推动力是来自我们在其中生存并为我们所感觉的世界的真正实在。这种实在充满了生命，并且没有充分的理由强调物质与精神、或者肉体与灵魂的区别。但在柏拉图的哲学中，人们已看到另一种实在开始抬头了。柏拉图在著名的洞穴的比喻中，将人比作洞穴中的囚犯，他们被捆缚着，只能朝一个方向看。在他们身后有一堆火，他们能从墙上看到他们自己和他们身后物体的影子。因为他们除了影子看不到任何其他东西，他们就把这些影子看作是实在的，而不知道物体本身。最后，囚犯之一逃跑了，从洞穴来到了阳光下。他这才第一次看到了真实的东西，并且认识到他过去一直被影子所欺骗。他这才第一次知道了真理，只能悲伤地回忆他在黑暗中度过的漫长生涯。真正的哲学家就是从洞穴逃到真理之光中的囚犯，他是一个具有真实知识的人。与真理的这种直接联系，或者我们可以用基督教徒的话说，与上帝的直接联系，是一种新的实在。这种实在已开始比我们的感官所感知的世界这一实在变得更强了。与上帝的直接联系是在人类的灵魂中，而不是在世界上发生的，自柏拉图以来的两千年内，这是比任何其他事情更费人思考的问题。在这个时期内，哲学家的眼睛是朝着人类的灵魂和它与上帝的关系，朝着伦

理学问题，朝着天启的解释，而不是朝着外部世界。只有到了意大利文艺复兴时代，才能看出人类精神的一种缓慢的变化，它最后复活了对自然的兴趣。

自从十六、十七世纪以来，与科学基本概念密切联系的哲学观念的发展，成为自然科学巨大发展的前驱，并相互影响。因此，从现代科学在今天所最终到达的地位出发来评价这些观念可能是有益的。

这个科学的新时代的第一个大哲学家是勒奈·笛卡儿(René Descartes)，他生活于十七世纪的前半期。他的那些对科学思想发展最为重要的观念，包含于他的《方法论》(*Discourse on Method*)之中。根据怀疑和逻辑推理，他试图为哲学体系找到一个全新的并如他所想象的那样坚实的基础。他不接受天启作为这样的基础，他也不愿不加批判地接受感官所感知的东西作为这样的基础。所以，他从他的怀疑方法开始。他对我们的感觉所告诉我们的关于我们推理结果的意见表示怀疑，最后他得到了他的名言："我思故我在"(cogito ergo sum)。我不能怀疑我的存在，因为这是由我在思想这一事实推论出来的。在用这种方法建立了我的存在之后，他基本上沿着经院哲学的路线，进一步证明上帝的存在。最后，从上帝给我以相信世界存在的强烈倾向这一事实出发，推论出世界的存在，因为上帝是绝对不可能欺骗我的。

笛卡儿哲学的这个基础与古代希腊哲学家的基础根本不同。这里的出发点不是基本的本原或实体，而是一种基本知识的尝试。并且笛卡儿认识到，我们对自己内心的了解比我们对外部世界的了解更为确实。但是他的出发点——**上帝-世界-我**这个"三角形"——却危险地简化了进一步推理的基础。开始于柏拉图哲学的物质与精神或灵魂与肉体的区分现在是完成了。上帝既和我相区别，又和世界相区别。上帝事实上被提到超乎世界和人类之上这

样的高度，以致于他最终出现在笛卡儿的哲学中只是作为建立我与世界之间的关系的一个共同参考点。

古希腊哲学曾试图通过寻求某种基本统一的本原来找到事物的无限多样性中的秩序，而笛卡儿则试图通过某种基本的区分来建立秩序。但是由于区分而形成的三个部分将多少失去它们的真义，如果其中任一部分被认为是同其他两部分区分出来的话。如果人们终究要使用笛卡儿的基本概念的话，重要的一点是上帝在世界与我之中，同样重要的是不能把我真正和世界分开。笛卡儿当然知道联系的无可争辩的必然性，但是以后的哲学和自然科学却在"思维实体"(res cogitans)和"广延实体"(res extensa)的两极基础上发展，而自然科学的兴趣集中在"广延实体"上。笛卡儿的区分对其后几个世纪人类思想的影响是怎样估计也不会过高的，但是，由于当代物理学的发展，下面我们必须加以批判的正是这种区分。

当然，说笛卡儿的新哲学方法开辟了人类思维的新方向，那是错误的；他所做的实际上只是第一次系统地表述了在意大利文艺复兴和宗教改革时代已露端倪的人类思维的倾向。这种倾向就是对数学的兴趣的复活（这表现了哲学中柏拉图成分日益增长的影响)和对人格宗教的极力强调。对数学的日益增长的兴趣倾向于这样一种哲学体系，这种哲学体系从逻辑推理开始，并试图以这种方法得到某些象数学结论那样肯定的真理。对人格宗教的强调将我及其与上帝的关系同世界区分开来。如从伽利略的工作可以看出的，将经验知识和数学结合的兴趣，或许部分地是由于用这种方法，能够得到某种能完全避免宗教改革所引起的神学争论的知识。这些经验知识能够用公式表示，而不用谈到上帝或我们自身，同时，这些知识倾向于将上帝-世界-我这三个基本概念区分开，或者将"思维实体"与"广延实体"区分开。在这个时期中，在

经验科学的先驱者当中有时似乎有一个明确的协议，这就是在他们的讨论中不应当提到上帝的名字和根本的原因。

另一方面，区分的困难从一开始就能清楚地看出来。例如，在区分"思维实体"与"广延实体"时，笛卡儿不得不把动物全部归入"广延实体"之中。因此，动物和植物与机器就没有本质的区别，它们的行为完全由质料因所决定。但是，要完全否认动物中有某种灵魂存在，总似乎是困难的，即令我们确信物理学和化学定律在生命机体中也严格成立，对于我们来说，象托马斯·阿奎那(Thomas Aquinas)的哲学中较陈旧的灵魂概念似乎也还比笛卡儿的"思维实体"概念更为自然，更不勉强。笛卡儿这种观点的后果之一是：如果把动物仅仅看作是机器一样的东西，就很难不设想人也是一样。在另一方面，因为"思维实体"与"广延实体"被认为在本质上完全不同，它们就似乎是不可能彼此相互作用的。因此，为了保持精神经验与肉体经验间的完全平行性，精神在其活动中也应当由一些同物理学和化学定律相对应的规律完全地决定。这里就产生了"自由意志"的可能性问题。显然，整个这种描述多少是有点人为的，它也显示了笛卡儿分类的严重缺陷。

另一方面，在自然科学中，这种分类在几个世纪以来是极为成功的。牛顿力学和所有以它为模型而建立的其他经典物理部门，都是从这样一个假设出发的，这就是假设人们能够描述世界，而不需要提到上帝或我们自身。很快地，这种可能性似乎差不多成为一般自然科学的必要条件。

但是，在这一点上，通过量子论，形势有了某种程度的变化，因此我们现在可以着手将笛卡儿的哲学体系和现代物理学中我们的现状作一比较。前面已经指出，在量子论的哥本哈根解释中，我们确实能够有所进展，而不用提到作为个人的我们自身，但是，我们也不能忽略自然科学是由人建立起来的这个事实。自然科学不单

单是描述和解释自然；它也是自然和我们自身之间相互作用的一部分；它描述那个为我们的探索问题的方法所揭示的自然。这或许是笛卡儿未能想到的一种可能性，但这使得严格把世界和我区分开成为不可能了。

在理解和接受量子论的哥本哈根解释方面，人们感到巨大的困难，即令是杰出的科学家爱因斯坦也不例外，人们可以从笛卡儿的分类那里追踪到这种困难的根源。在笛卡儿以来的三个世纪中，他的这种分类已经深深地渗入人类的心灵，因此要把实在这个问题用一个根本不同的方式来替代，是需要很长的时间的。

关于"广延实体"，笛卡儿的分类所持的立场是人们可以称之为形而上学的实在论。世界，即广延之物"存在"着。这和实用的实在论是有区别的。实在论的几种不同形式可以描述如下。如果我们要求一个陈述的内容不依赖于它能被证实时所处的那些条件，我们就把这个陈述"客观化"了。实用的实在论假设，确有一些陈述能被客观化，事实上，我们的日常生活经验绝大部分是由这样一些陈述所组成。教条的实在论要求所有有关物质世界的陈述都能够客观化。实用的实在论过去一直是、今后也永远是自然科学的主要部分。然而，教条的实在论，如我们现在所看到的，则不是自然科学的一个必要条件。但它在过去科学的发展中起了十分重要的作用；实际上，经典物理学的立场就是教条实在论的立场。只有通过量子论，我们才懂得精密科学不以教条的实在论为基础是可能的。当爱因斯坦批评量子论时，他正是从教条的实在论的基础上出发的。这是十分自然的态度。每一个从事研究工作的科学家都感到他正在研究的东西是客观地真实的。他力求使他的陈述不依赖于它们能被证实时所处的那些条件。特别在物理学中，我们能用简单的数学定律解释自然这一事实告诉我们，在这里我们接触到的是实在的某种真正的特征，而不是我们自己所捏造出来的某种东

西(从任何字面的意义上来理解)。这正是当爱因斯坦取教条的实在论作为自然科学基础时,他在内心所持的立场。但是,量子论本身就是能够不用这个基础而只用简单的数学定律解释自然的例子。如果人们拿这些定律和牛顿力学相比较,它们似乎不十分简单。但是,如果考虑到被解释的现象的巨大复杂性(例如复杂原子的光谱线),量子论的数学方案还算是比较简单的。自然科学实际上是能够不以教条的实在论为基础的。

形而上学的实在论认为"事物真正存在着",从而比教条的实在论更前进了一步。这实际上就是笛卡儿企图用"上帝不能欺骗我们"的这个论据来证明的东西。就这里出现"存在"这个词来说,事物真正存在着这个陈述是不同于教条的实在论的陈述的,就这里出现的"存在"这个词来说,同它在另一陈述"我思故我在"中具有同样的意义。……"我思,故我在。"但是,在这里,这个尚未包含在教条的实在论的命题中的意义却是很难理解的;这就引导我们对"我思故我在"这个陈述作出一般性批评,而笛卡儿是把它当作他能在其上建立他的体系的坚实基础。确确实实,这个陈述具有和数学结论一样的确定性,如果"我思"与"我在"等词是用日常方式定义的话,或者,更谨慎同时更严格地讲,如果上述两词定义的方式使得上述陈述可以随之作出的话。但是,这什么也不能告诉我们,究竟我们在探索我们的道路时,我们能使用"思维"和"存在"的概念到怎样的程度。归根结蒂,在很普遍的意义上,总有这样一个经验性的问题:我们的概念究竟能使用到怎样的程度?

形而上学的实在论的困难,在笛卡儿之后就立刻被感觉到了,并且成了经验论哲学、成了感觉论和实证论的出发点。

可以作为早期经验论哲学的代表的三位哲学家是洛克(Locke)、贝克莱(Berkeley)和休谟(Hume)。与笛卡儿相反,洛克认为,一切知识最终都以经验为基础。这种经验可以是感觉或我们心智

作用的知觉。洛克这样说:知识是两种观念符合或不符合的知觉。第二步是贝克莱迈出的。如果实际上我们的知识是由知觉推导出来的,那么,说事物真实存在的陈述就没有意义了;因为只要知觉是既定的,不管事物存在还是不存在,都不可能有任何差别。因此,被知觉到就是等同于存在。这条论证的路线后来又被休谟发展到极端的怀疑论,他否认归纳法和因果关系,并由此得到这样一个结论,要是认真地采纳它,就会摧毁全部经验科学的基础。

已在经验论哲学中所表现的对形而上学实在论的批评,就它是反对朴素地使用"存在"一词的警告来说,那当然是正确的。这种哲学的实证的陈述也能从相似的路线加以批评。我们的知觉最初并不是一堆颜色或声音;我们所知觉的已经是被知觉的某物,这里的重点是在"物"一词上,因此,用知觉代替物作为实在的最终元素,我们是否能得到什么东西,是值得怀疑的。

现代实证论者已清楚地认识到基本的困难。这条思维路线表达了对朴素地使用如"物"、"知觉"、"存在"这样一些术语的批评,其方法是通过一般的假设:一个已定句子究竟有无意义这样的问题应当永远受到彻底和严格的审查。这个假设和它的基本态度是从数理逻辑推导出来的。自然科学的步骤被描绘为就象是在现象上附加上一些符号。就象在数学中一样,这些符号能按照一定的规则结合起来,这样,关于现象的陈述就能用符号的组合来表示。然而,不按照规则行事的符号组合并不是错误的,而只是没有意义而已。

这种论证的明显困难是没有一个普遍的判据来判别一个句子在什么时候应被认为是没有意义的。只有当句子属于一个概念和公理的闭合系统时,才有可能作出确定的判断,这在自然科学的发展中与其说是惯例,不如说是一个例外。在某些情况下,关于某个句子是没有意义的推测,曾经导致历史上的重要进展,因为它开辟

了建立新的联系的道路，而这种新联系在句子是有意义的条件下是不可能建立的。前面讨论过的量子论中的一个例子就是这样的句子："电子在什么样的轨道中绕着原子核运动？"但是，一般地讲，从数理逻辑所作出的实证论方案在对自然的描述中是太狭窄了，对自然的描述必须使用仅有含糊的定义的词与概念。

一切知识最终都以经验为基础这样一个哲学命题，最后导致一个有关自然的任何陈述都有逻辑明确性的假设。这样的假设似乎在经典物理学时期就已经被证实了，但是自从量子论建立以来，我们已知道它不能成立。例如，一个电子的"位置"和"速度"等词，不论在它们的意义上和它们可能的联系上，似乎全都很好地定义了，事实上，它们是在牛顿力学的数学框架中明确地定义了的概念。但是，从测不准关系看来，实际上它们并没有很好地被定义。人们可以说，考虑到它们在牛顿力学中的地位时，它们是很好地定义了的，但在它们和自然的关系方面，它们并没有很好地定义下来。这表明，我们决不能预先知道，在把我们的知识推广到只能用最精密的仪器才能深入进去的自然的微小部分中去时，对某些概念的适用性应该加上什么样的限制。因此，在深入过程中，有时我们不得不这样使用我们的概念，这种使用方式既不正当，也没有任何意义。坚持完全的逻辑明确性这一假设会使得科学成为不可能。在这里，现代物理学使我们想起一句古老的格言：一个人坚持要不讲一句错话，那就得永远默不作声。

在德国唯心主义的奠基人康德(Kant)的哲学中，企图把两条思维路线结合起来，其中一条是从笛卡儿开始的，另一条是从洛克和贝克莱开始的。和现代物理学的结果相比较，康德有一部分工作是重要的，这部分工作包含在《纯粹理性批判》(*The Critique of Pure Reason*)一书中。他提出了一个问题：知识是否仅仅起源于经验，或者还能来自其他的源泉？他得出的结论是：我们的知识有

一部分是“先天的”(apriori),而不是从经验归纳地推论出来的。因此，他区分了“经验的”知识和“先天的”知识。同时，他也区分了“分析”和“综合”的命题。分析的命题仅仅从逻辑推出，如果否认它们将导致自相矛盾。所有不是“分析”的命题，就称为“综合”的命题。

根据康德的见解，什么是“先天的”知识的标准呢？康德同意，一切知识从经验开始，但他又加上一句，知识并不总是从经验推导出来的。确实，经验告诉我们某种东西有这样或那样的性质，但经验并不告诉我们它不能是别的。因此，如果一个命题是和它的必然性一同被想出的，它就必定是“先天的”。经验从来没有赋予它的判断以完全的普遍性。例如，“太阳在每天早晨升起来”这句话意味着我们知道在过去这个规律没有例外，并且我们预料它在未来仍然成立。但我们可以想象这个规律的例外。如果一个判断是以完全的普遍性来陈述的，那么，如果不能想象有任何例外，它就必定是“先天的”。一个分析的判断总是“先天的”；即令一个小孩是从玩弹子中学到算术的，他也不需要在以后去重新体验以理解“二加二等于四”的论断。另一方面，经验知识是综合的。

但是先天的综合判断是可能的吗？康德试图用似乎满足上述标准的例子来证明这一点。他说，空间和时间是纯直观的先天形式。在空间的例子中，他作出了下述形而上学的推论：

1. 空间不是一个从其他①经验抽象出来的经验概念，因为在认为某些感觉是起因于外部的某些东西时，一定要以空间观念作为前提，而且外部经验只有通过空间的表象才是可能的。

2. 空间是构成一切外部知觉的基础的必要的、先天的表象；

① 此处“其他”(other)一词，是“外部”(external)一词之误。参见康德：《纯粹理性批判》，德文版。——译者注

因为我们不能设想没有空间，虽然我们能够设想在空间中没有任何东西。

3. 空间不是一个关于一般物的关系的推论概念或一般概念，因为只有一个唯一的空间，而我们所说的各种“空间”，都是那独一无二的空间的各个部分，而不是它的各种实例。

4. 空间被表象为一个无限的给定的量，它把空间的一切部分囊括于自身之内；这种关系不同于概念对其实例的关系，因此空间不是一个概念，而是一个直观形式。

这些论证将不在这里讨论。提到它们，仅仅是作为在康德心目中关于先天的综合判断的一般类型证明的一个例子。

在物理学方面，除了空间和时间之外，康德认为因果律和实体概念也是先天的。在他的工作的后一阶段，他还试图把物质不灭定律、“作用和反作用”相等、甚至万有引力律也包括在内。在这方面没有一个物理学家愿意追随康德，如果“先天的”一词是在康德给它的绝对意义上来使用的话。在数学方面，康德把欧几里得几何学看作是“先天的”。

在我们将康德的这些学说和现代物理学的结果作比较之前，我们必须提到以后我们要引用到的他的另一部分工作。曾经成为经验论哲学的起因的“事物是否真正存在”这个可厌的问题，也在康德的体系中出现过。但是康德并没有追随贝克莱和休谟的路线，虽然那条路线在逻辑上较为前后一致。他保留了不同于知觉的“物自体”的观念，这样也就保留了与实在论的某种联系。

现在来将康德的学说和现代物理学作比较，首先，看起来好象他的“先天的综合判断”的中心概念已被本世纪的发现完全消灭了。相对论已改变了我们的时空观念，事实上，它已揭示了空间和时间的全新特征，这些特征在康德的纯直观的先天形式中是一点

也看不出的。因果律在量子论中不再适用，物质不灭律对于基本粒子也不再成立。虽然康德不能预见这些新的发现，但是既然他确信他的概念是“任何能称为科学的未来的形而上学的基础”，那么看一看他的论证在那里错了，是有意义的。

我们举因果律作为一个例子。康德说，每当我们观察一个事件，我们都假设有一个居先的事件，跟着那个事件必有另一个事件按照某种规律随着发生。这，如康德所论述，是一切科学工作的基础。在这个讨论中，我们是否总能找到为另一事件所跟随的居先事件，这并不重要。实际上，在许多情况下，我们能找到它。而且即使我们不能找到它，也没有任何东西能阻挡我们询问这个居先事件可能是什么并且去寻找它。由此可见，因果律归结为科学研究方法；它是科学能够成立的先决条件。既然我们实际上应用了这种方法，因果律就是“先天的”，而不是从经验推导出来的。

这在原子物理学中也正确吗？让我们考察一个能够发射出一个α粒子的镭原子。发射α粒子的时间不能预测。我们只能说平均起来辐射将在大约两千年内发生。因此，当我们观测发射，我们并不实际寻找那个使得发射必定按照某种规律随之发生的居先事件。从逻辑上说，完全有可能寻找这样一个居先事件，我们不必因为迄今为止还没有人发现这种事实而沮丧失望。但是为什么在这个自康德以来一直是很根本性的问题中，科学方法实际上已经改变了呢？

对这个问题可以作出两个可能的答案。一个是：根据经验，我们确信量子论的定律是正确的，如果是这样的话，我们知道，作为发射在一个给定时间发生的原因的居先事件是无法找到的。另一个答案是：我们知道居先事件，但并不十分准确。我们知道，引起α粒子发射的是原子核中的力。但是，这种知识中包含了原子核与世界的其余部分之间的相互作用所带来的不确定性。如果我们

想要知道为什么α粒子在那个特定时间发射，我们必须知道包括我们自身在内的整个世界的微观结构，而这是不可能的。由此可见，康德关于因果律先天性的论证就不再成立了。

对于作为直观形式的空间和时间的先天特性也能作类似的讨论。结果将是一样的。康德认为是一种不容争辩的真理的先天概念不再包含在现代物理学的科学体系中了。

然而它们在多少不同的意义上构成了这个体系的主要部分。在量子论的哥本哈根解释的讨论中，曾经强调指出，我们在描述我们的实验装置时，更一般地讲，在描述不属于实验对象的那部分世界时，使用了经典概念。包括时间、空间和因果性在内的这些经典概念的使用，事实上是观测原子事件的条件，并且是“先天的”(在这个词的本义上说)。康德所没有预料到的是这些先天的概念能够作为科学的条件而同时只能在有限的范围内适用。当我们作一个实验，我们必须假设有一条事件的因果链，这条链从原子事件开始，通过仪器，最后到达观测者的眼睛；如果不假设这种因果链，关于原子事件就毫无所知了。然而我们也必须牢记经典物理学和因果性只有有限的适用范围。康德所未能预见的正是量子论的这种基本佯谬。现代物理学已经改变了康德关于先天的综合判断的可能性的陈述，将它从形而上学的陈述转变为实用的陈述。这样，先天的综合判断便具有相对真理的特征。

如果人们用这种方式重新解释康德的“先天性”，就没有理由认为，知觉是给予的，而事物却不是。就象是在经典物理学中一样，我们能够象谈论那些被观察到的事件那样谈论那些未被观察的事件。因此，实用的实在论是新解释的固有的部分。在考察康德的“物自体”时，康德曾指出，我们不能从知觉作出关于“物自体”的任何结论。这种陈述，如威札克尔所指出，在如下的事实中有它的形式类似性，就是虽然在所有的实验中使用了经典概念，原子对象的

非经典行为仍是可能的。对于原子物理学家，“物自体”最终是一种数学结构，如果他一定要使用“物自体”这个概念的话；但是这种数学结构——与康德相反——是间接地从经验推导出来的。

在这种新解释中，康德的“先天性”是与经验间接联系的，不过这些经验是通过长时期以来人类精神的发展而形成的。生物学家洛伦兹(Lorentz)遵循这种论据，曾经把“先天的”概念和动物中称为“遗传的或天赋的安排”的行为形式作了比较。对于某些原始动物，空间和时间不同于康德所谓的我们对空间和时间的“纯直观”，这确实是完全说得通的。后者可以属于“人”这个种类，但不属于不依赖于人的世界。但是，在追随对“先天性”的这种生物学解释时，我们或许进入了过于假想的讨论了。这里所论述的仅仅是作为一个例子来说明，“相对真理”一词当与康德的“先天性”相联系时能够作怎样的解释。

现代物理学在这里被用作检验若干以往的重要哲学体系的结果的一个例子，或者说一个模型，这些哲学体系过去当然被认为是在更广阔得多的领域内也成立的。我们已经学到的，特别是从对笛卡儿和康德的哲学的讨论中所学到的，或许可叙述如下：

在过去通过世界和我们自身的相互作用所形成的任何词和概念，在它们的涵义方面，都不是真正严格地规定了的；这就是说，我们不能准确地知道，在寻求我们在世界中的途径方面，它们对我们会有多大帮助。我们常常知道，能将它们应用于广阔范围的内外经验，但实际上我们永不能准确地知道它们适用的范围。即使对最简单和最普遍的概念如“存在”和“空间和时间”来说，这也是如此。由此可见，仅靠单纯推理，要得到某种绝对真理是决不可能的。

然而，概念在它们的相互联系方面，可以严格地规定。当概念变成能用一个数学方案前后一致地表示的公理和定义的系统的一

部分时，这确实是事实。这样一组有联系的概念可以应用于广阔领域的经验，并将帮助我们在这个领域内找到我们的途径。但是一般将不会知道适用的限度，至少不会完全知道。

即令我们认识到，一个概念的意义从来没有绝对准确地被规定过，某些概念仍然构成了科学方法的一个主要部分，因为它们暂时代表了过去（甚至是很遥远的过去）人类思维发展的最终结果；它们甚至是可以遗传的，并且无论如何，是从事现代科学工作的必不可少的工具。在这个意义上，它们在实用上可以是先天的。但是，关于它们的适用性的进一步限制可以在将来发现。

第六章

量子论和自然科学其他部分的关系

前面已经说过，自然科学的概念有时在它们的联系方面可以严格地规定。在牛顿的《自然哲学的数学原理》(*Principia*)中第一次认识了这种可能性，并且，正是由于这个理由，牛顿的工作对其后几个世纪整个自然科学的发展发生了巨大的影响。牛顿的《自然哲学的数学原理》一书从一组定义和公理开始，这些定义和公理是这样内在地联系在一起，以致它们构成了人们可称为“闭合系统”的一组东西。每一个概念能用一个数学符号表示，而不同概念之间的联系可以用数学符号的数学方程来表示。系统的数学映象保证系统中不出现矛盾。这样，物体在作用力的影响下可能产生的运动就由方程的可能解所表示。能够用一套数学方程表示的定义和公理系统，被看作是描述自然的永恒结构的系统，既与特殊的空间无关，也与特殊的时间无关。

系统中不同概念之间的联系是如此密切，以致人们一般不能改变任何一个概念而不破坏整个系统。

由于这个原因，牛顿的系统长时期以来被看作是最终的系统，而以后科学家的任务似乎仅仅是把牛顿力学推广到广阔范围的经验中去。实际上差不多有两个世纪，物理学正是沿着这些路线发展的。

从质点运动的理论出发，人们能够转向固体力学，转到旋转运动，并且还能够处理流体的连续运动或弹性体的振动。力学或者动力学的所有这些部分都密切结合着数学的进展，特别是微积分

的进展，而逐渐地发展；它们的结果已为实验所检验。声学和水力学变成了力学的一部分。另一个明显地应用了牛顿力学的科学是天文学。数学方法的进步渐渐地引导到愈来愈准确地测定行星的运动和它们的相互作用。当发现电和磁的现象时，人们将电力和磁力同万有引力作了比较，它们对物体运动的作用仍然能够沿着牛顿力学的路线进行研究。最后，到十九世纪，在假设热实际上是由物质的最小部分的复杂的统计运动所组成的之后，甚至热学也能归结为力学了。克劳修斯(Clausius)、吉布斯(Gibbs)和玻耳兹曼(Boltzman)将几率的数学理论的概念与牛顿力学的概念相结合，从而得以证明热学的基本定律能够解释为是从应用到非常复杂的力学系统的牛顿力学所推导出来的统计定律。

到此为止，牛顿力学所提出的纲领已经完全前后一致地实现了，并且导致对广阔范围的经验的了解。第一个困难发生于法拉第和麦克斯韦的工作中对电磁场所进行的讨论中。在牛顿力学中，万有引力被认为是已定的，而不是进一步理论研究的对象。然而，在法拉第和麦克斯韦的工作中，力场本身变成了研究对象；物理学家想知道这个力场怎样作为空间和时间的函数而变化。因此，他们尝试建立场的运动方程，而不是首先建立受场作用的物体的运动方程。这种变化使人们回到牛顿以前的许多科学家所持的一种观点。那时的人们看来一种作用从一个物体传递到另一个物体，似乎只有当两个物体相互接触时才有可能，例如通过碰撞或摩擦。牛顿引入了一个很新奇的假说，假设了一种发生超距作用的力。现在，在力场的理论中，人们可以回到老的观念，认为作用是从一点传递到一个邻近点的，只能用微分方程来描述力场的行为。这实际上证明是可能的，因此，由麦克斯韦方程所给出的电磁场的描述似乎是关于力的问题的一个令人满意的解。这里人们已经改变了牛顿力学的纲领。牛顿的公理和定义涉及到物体和它们的

运动；而对于麦克斯韦，力场似乎应该具有和牛顿理论中的物体同样程度的实在性。这种观点当然不容易被接受；并且为了避免实在概念中的这样一种改变，将电磁场和弹性形变场或应力场相比拟，将麦克斯韦理论的光波和弹性体中的声波相比拟，似乎是讲得通的。因此，许多物理学家相信麦克斯韦方程实际上和一种弹性媒质的形变有关，他们把这种媒质称为以太；其所以给予这个名称，仅仅是为了表明这种媒质是如此之轻和稀薄，以致于它能穿过其他物质而不能被看到或感觉到。然而，这种解释是不太令人满意的，因为它不能解释为什么没有任何纵光波出现。

最后，将在下章讨论的相对论结论性地表明，与麦克斯韦方程有关的作为一种实体的以太概念，必须放弃。全部论证不能在这里讨论，但其结果是必须认为场是一种独立的实在。

狭义相对论的进一步的并更令人吃惊的结果是空间和时间的新性质的发现，实际上是空间和时间之间的联系的新性质的发现，这种性质在以前是不知道的，也是牛顿力学中所没有的。

在这种全新形势的影响下，许多物理学家得出了下面的多少有点轻率的结论：牛顿力学已经最终地被否定了。原始的实在是场而不是物体，而空间和时间的结构是由洛伦兹(Lorentz)和爱因斯坦的公式正确地描述的，而不是由牛顿的公理描述的。牛顿力学在许多情况下是一个很好的近似，但现在必须改进它，才能给出对自然的更为严格的描述。

根据我们最后在量子论中形成的观点，这样一种陈述似乎是对实际情况的一种很蹩脚的描述。第一，它忽略了这个事实，就是大部分用来测量场的实验都是以牛顿力学为基础的，第二，牛顿力学是不能改进的，它只能由某些本质上不同的东西来代替。

量子论的发展教导我们，人们宁可用下述词句来描述上述的情况：凡是能用牛顿力学概念来描述自然事件的地方，牛顿所建立

的定律都是严格正确的，并且是不能改进的。但是电磁现象不能用牛顿力学的概念作适当描述。由此可见，关于电磁场和光波的实验，连同由麦克斯韦、洛伦兹和爱因斯坦对它们所作的理论分析一起，导出了一个新的能用数学符号表示的定义、公理和概念的闭合系统，这个系统象牛顿力学系统一样是前后一贯的，但在本质上与牛顿力学不同。

由此可见，甚至同自牛顿以来的科学家的工作相伴随的那些希望也必须改变了。显然，科学中的进展不能老是通过用已知的自然律来解释新现象的办法来实现。在某些情况下，被观测到的新现象只能用新概念来理解，采用这些新概念来解释新现象就象用牛顿的概念来解释力学事件一般。这些新概念又能联结成一个闭合系统，并可用数学符号表示。但是，如果物理学，或者更一般地讲，自然科学沿着这条道路前进的话，问题就发生了：不同的概念集之间的关系是什么？例如，如果在不同的概念集之中出现了同样的概念和词，但它们在它们的联系和数学表示方面却有不同的定义，那么，这些概念是在什么意义上代表实在的呢？

当狭义相对论发现时，这个问题立刻产生了。空间和时间的概念既属于牛顿力学，也属于相对论。但是在牛顿力学中，空间和时间是彼此独立的；在相对论中，它们则由洛伦兹变换联系起来了。在这个特例中，人们能够证明，相对论的陈述在系统中全部速度都远小于光速的限度内是接近于牛顿的陈述的。从这里人们可以作出结论说，牛顿力学概念不能应用于出现了与光速相近的速度的事件。从这里人们终于发现了牛顿力学的一个本质界限，这不能从前后一贯的概念集中看出来，也不能仅仅从对力学系统的观测得出。

由此可见，两个不同的前后一贯的概念集之间的关系常常需要很细致的研究。在我们进入关于这种闭合的和首尾一贯的概念

集的结构以及它们的可能关系的一般性讨论之前，我们将对长久以来就在物理学中规定了的那些概念集作一简要的描述。人们能够区别出四个已经定型的系统。

第一个概念集，即牛顿力学，已经讨论过。它适合于描述一切力学系统、流体运动和物体的弹性振动；它包含了声学、静力学和空气动力学。

第二个闭合的概念系统是在十九世纪联系着热学的发展过程而形成的。虽然热学能够通过统计力学的发展最终与力学联系起来，但把它就当作力学的一个部分还是不现实的。实际上，热的现象学理论使用了许多概念，它们在物理学的其他部门中没有对应的东西，例如：热、比热、熵、自由能，等等。如果人们从这种现象学描述转到统计解释，把热看作能量，根据物质的原子结构，统计地分布在许多自由度之中，那么，热学与力学的联系就不见得比与电动力学或其他物理学部门的联系来得多。这种解释的中心概念是与现象学理论中熵的概念密切联系的几率概念。除此以外，热的统计理论还需要能量的概念。但是物理学中公理和概念的任何首尾一贯的集必须包含能量、动量和角动量以及这些量在某些条件下守恒的定律。如果首尾一贯的概念集预定要描述在任何时候、任何地点都是正确的某种自然特征；换句话说，如果这些特征不依赖于时间和空间，或者用数学家的说法，如果在空间和时间的任何平移中，在空间的转动中，在伽利略—或洛伦兹—变换中，这些特征都是不变的，那么，这就可以成立。因此，热学能够和任何其他闭合的概念集相结合。

第三个概念与公理的闭合集起源于电和磁的现象，并在二十世纪的头十年通过洛伦兹、爱因斯坦、闵可夫斯基(Minkowski)的工作而达到它的最终形式。它包含了电动力学、狭义相对论、光学、磁学，并且人们还可以把各种不同的基本粒子的物质波的德波

罗意理论也包括在内，但是不包括薛定谔的波动理论。

最后，第四个首尾一贯的概念集主要是头两章所描述的量子论。它的中心概念是几率函数，或者如数学家所称呼它的“统计矩阵”。它包括量子力学和波动力学、原子光谱理论、化学、物质的其他性质如电导性、铁磁性等等的理论。

这四个概念集之间的关系能用下列方式表明：第一概念集可以被包含在第三概念集内，作为光速可被当作无限大的一种极限情形；第一概念集也可以被包含在第四概念集内，作为普朗克作用常数可被当作无限小的一种极限情形。第一概念集和部分第三概念集属于第四概念集，它们对于实验描述是先验的。第二概念集能毫无困难地和其他三个概念集的任一个相联系，而特别重要的是它与第四概念集的联系。第三概念集和第四概念集的独立存在预示了第五概念集的存在，相对于它，第一、三、四概念集都是极限情形。这第五概念集或许在不久的将来就能够联系着基本粒子理论而被发现。

我们在上面列举的概念集中忽略了与广义相对论相联系的概念集，因为这个概念集或许尚未达到它的最终形式。但是应当着重指出，它和其他四个概念集是迥然不同的。

在这样简短的考察之后，我们可以回到一个更一般的问题：人们应当把什么当作这种公理和定义的闭合系统的特征呢？或许最重要的特征是找到它的前后一致的数学表示的可能性。这种表示必须保证系统不自相矛盾。其次，系统还必须适合于描述广阔领域的经验。在这个领域内多种多样的现象应当对应于数学表示中一些方程的许多个解。领域的限制一般不能从概念导出。概念在它和自然的关系方面，不是严格地规定了的，虽然严格地规定了它们之间的可能联系。因此，限制将从经验找出，从概念不容许对被观测的现象作完全的描述这一事实找出。

在对这个现代物理学结构作简要分析之后，物理学和自然科学的其他部门的关系也可以讨论了。物理学最近的相邻学科是化学。实际上,通过量子论这两门科学已经完全融合了。但在一百年前,它们隔离得很远,那时它们的研究方法完全不同,那时的化学概念在物理学中没有对应的概念。价、活性、溶解度和挥发性这一类概念具有比较定性的特征,因而化学很难算是精密科学。当上世纪中叶热学发展起来以后,科学家开始将它应用于化学过程，并且自那时起，这个领域的科学工作一直为把化学定律归结为原子力学的希望所决定。应当强调指出,无论如何,这在牛顿力学的框架中是不可能办到的。为了作出化学定律的定量描述，人们必须为原子物理学建立一个更广泛的概念系统。这终于在量子论中办到了，它在化学中有其泉源就同在原子物理学中一样。因而很容易看出,化学不能归结为原子粒子的牛顿力学,因为化学元素在它们的行为中显示出来的稳定性程度在力学系统中是完全没有的。但是一直到 1913 年玻尔的原子理论建立以后，才清楚地了解了这一点。最后,人们可以说,化学概念是部分地互补于力学概念。如果我们知道一个原子处于决定它的化学性质的最低的定态中，我们就不能同时谈论电子在原子中的运动。

目前生物学作为一方与物理学和化学作为另一方之间的关系很象一百年前物理学与化学的关系。生物学方法不同于物理学和化学方法，典型的生物学概念比那些精密科学的概念具有更为定性的特征。譬如生命、器官、细胞、器官的功能、知觉等概念在物理学和化学中都没有对应的概念。另一方面，过去一百年内生物学中的绝大部分进展，都是通过在生命机体中应用化学和物理学而得到的，而现在生物学的整个趋势是根据已知的物理学和化学定律去解释生物学现象。这里又发生了一个问题：这种希望是否正当？

就象化学中的情形一样，人们从简单的生物学经验知道，生命机体呈现一定的稳定性，当然，由许多类型分子组成的复杂结构，如果只根据物理学和化学定律，一般不能具有这种稳定性。由此可见，要完全理解生物学现象，还必须在物理学和化学定律之外，再加上某种东西。

关于这个问题，两种截然不同的观点常常在生物学文献中展开争论。一种观点涉及与现代遗传学有联系的达尔文(Darwin)的进化论。按照这个理论，为了理解生命，在物理学和化学概念之外，必须加上的唯一概念是历史的概念。自地球形成以来，已差不多过了四十亿年①，这个漫长的时间，给予了自然界尝试几乎无限多种分子团结构的可能性。在这些结构中，最后有某种能利用周围物质的较小分子团来再生自己的结构，因而这样的结构能够被大量地创造出来。这种结构中的偶然变化又为现存的结构提供更多的多样性。不同的结构必定会为从周围物质吸取质料而竞争，这样，按照“适者生存”的法则，终于发生了生命机体的进化。无可怀疑，这个理论包含了大量的真理，有许多生物学家主张，在前后一贯的物理学和化学的概念集中加上历史和进化的概念，就足以解释全部生物学现象。常常被用来支持这个理论的论点之一强调指出，在生命机体中的任何地方检验物理学和化学定律，总发现它们是正确的；似乎确实没有空子可以让不同于物理力的某种“生命力”钻入。

另一方面，正是这个论点由于量子论的建立而失去了很大的份量。因为物理学和化学的概念构成了一个闭合的前后一贯的集，即量子论的概念集，所以，就要求凡是能用这些概念描述现象的地方，联结这些概念的定律也必定成立。因此，人们在哪里把生命机体当作一个物理-化学系统，它们在那里的行为也就必定需要象

① 近年来的估算是46亿年左右。——译者注

一个物理-化学系统那样。我们能够从中得到有关第一种观点的适用性的某种知识的唯一问题是物理-化学概念是否允许对机体作完全的描述。对这个问题作否定的回答的生物学家一般持第二种观点，下面就解释这种观点。

这第二种观点或许可用下列术语来描述：很难理解，象知觉、器官的功能、感情等概念怎么会是与历史概念相结合的首尾一贯的量子论概念集的一个部分。另一方面，这些概念对生命现象的完全描述又是必要的，即使我们暂时把人类当作在生物学之外提出的新问题而排除在外。由此可见，为了理解生命，或许有必要在量子论之外，建立一个新的首尾一贯的概念集，对于这个概念集，物理学和化学可以是一种"极限情形"；历史概念可能是它的主要部分，而象知觉、适应、感情等概念也将属于它。如果这种观点是正确的，那么，达尔文的理论与物理学和化学相结合应该还不足以解释有机生命；但是，这里有一点仍然是真实的，即可以在很大程度上把生命机体当作物理-化学系统——如笛卡儿和拉普拉斯(Laplace)所说的机器——并且，如果这样看待它，它也将这样反应。同时，人们能够假设，象玻尔所建议的那样，我们关于活细胞的知识同我们关于它的分子结构的完整的知识可能是互补的。因为关于这种结构的完整的知识，可能只有通过破坏细胞生命的操作才能得到。生命会妨碍对它的内在的物理-化学结构进行完全测定，这从逻辑上说是可能的。即使人们持这第二种观点，他们大概也推荐不出其他生物学研究方法，来代替近几十年来所采取的生物学研究方法：就是根据已知的物理学化学定律去尽量解释生命现象，并且谨慎地描述有机体的行为而不抱任何理论偏见。

在现代生物学家中，持第一种观点的比持第二种观点的更为普遍；但现有的经验当然还不足以在两种观点当中作出抉择。许多生物学家偏爱第一种观点可能也是由于笛卡儿的分类，它在几

个世纪以来已经如此深入人心了。因为“思维实体”仅限于人，仅限于“我”，动物可能没有灵魂，它们专属于“广延实体”。因此，人们这样争辩说，动物能同一般物质一样用同一类术语来理解，而物理学和化学定律与历史概念相结合，就必定足以解释它们的行为。只有当“思维实体”被引入时，才出现需要全新概念的新情况。但是，笛卡儿分类是一种危险的过分简化，因此，十分可能，第二种观点才是正确的。

完全撇开这个现在还不能阐明的问题不谈，我们距离一个描述生物学现象的首尾一贯的、闭合的概念集也还很遥远。生物学中的复杂程度是如此令人沮丧，以致人们现在还不敢设想任何这种概念集，其中概念间的联系能如此严格地规定，以致有可能使用数学表示。

如果我们除了生物学之外，对心理学也进行讨论，那么，毫无疑问，物理学、化学和进化的概念结合在一起，是不足以描述事实的。在这点上，量子论的存在已经改变了我们在十九世纪所相信的那种见解。在那个时期，若干科学家倾向于设想心理现象最终能根据大脑的物理学和化学而作出解释。根据量子理论的观点，没有理由作这样一种假设。即使脑中的物理事件属于心理现象，我们也不期望这些就足以解释它们。我们决不怀疑，大脑象物理-化学机构一样起作用，如果我们是这样看待它的话，但是，为了理解心理现象，我们须从这样一个事实出发，就是人类的精神在进入心理学的科学过程时，既是研究的对象，又是研究的主体。

回顾过去形成的不同概念集或展望将来我们用科学方法寻求通过世界的道路的努力中可能形成的新概念集，我们发现，它们似乎是按照这样的顺序出现的：就是在概念集当中有主观因素参与的部分在逐渐增加。我们可把经典物理学看作是我们所说的与我们完全分开的世界的理想化。头三个概念集都对应于这种理想化

情形。只有第一个概念集完全按照康德哲学中的“先天性”行事。在第四个概念集中，即量子论的概念集中，人作为科学的主体，通过用人类科学的先天性术语向自然界提出的那些问题而引入。量子论不容许对自然作完全客观的描述。在生物学中，它对于完全理解本身是一种生命机体的人类所提出的问题可能是重要的，换句话说，甚至在我们科学地定义生命以前，我们已知道生命是什么了。但人们或许不应当对尚未形成的概念集的可能结构作任意的推测。

当人们将这种顺序与属于自然科学较早阶段的分类相比较时，人们发现，现在已不能将世界分成不同种类的对象，而只能分成不同种类的联系。在科学的较早期，人们区分不同种类的矿物、植物、动物和人等等。这些对象是按照它们的不同性质、由不同质料构成、由不同的力决定它们的行为而分类的。现在我们知道，同一种物质，同样的几种化合物，总是可以属于任何对象，既可属于矿物，亦可属于动、植物，而且作用于物质的不同部分间的力在每种对象中最终也都是一样的。能够区分的只是联系的种类，这在一定的现象中是头等重要的。譬如，当我们谈到化学力的作用时，我们所指的是一种比牛顿力学所表示的联系更为复杂并且迥然不同的联系。因此，世界就象一个由许多事件构成的复杂组织，在这个组织中各种联系变化着，重复着，结合着，并且从而决定着整个结构。

当我们用概念、公理、定义和定律的一个闭合的、首尾一贯的集来表示一组联系，而这个集又用一个数学方案来表示时，我们在这里为了阐明问题的目的，事实上已经把这组联系隔离起来并理想化了。但即令作了这样完全的阐明，仍不能知道这个概念集描述实在能准确到怎么样的地步。

这些理想化可以称为由世界与我们之间的相互作用而形成的

人类语言的一部分，称为人类对自然挑战的答复。在这方面它们可以同艺术的不同风格，譬如建筑和音乐的不同风格相比较。一种艺术风格也可以由应用于这特种艺术素材的造型规则集所规定。这些规则在严格意义上或许是不能用一个数学概念和方程集来表示的，但它们的基本要素却与数学的本质要素很密切地关联着。相等与不等、重复与对称、一定的结构组合在艺术和数学中都起着基本的作用。从造型的开端发展到标志它的完成的丰富的精细造型，常常需要好几代的工作。艺术家的兴趣集中于后来被称为艺术风格的这种体系，从它的吸取艺术素材的简单形象化过程开始，通过艺术家的作用，直到由这种风格的最初一些造型概念所开创的各种各样造型的形成。在完成之后，兴趣必定又渐渐消失，因为"兴趣"一词意味着：与某种东西在一起，参与一种生活过程，但然后这种过程又结束了。这里，艺术风格的造型规则能够表现艺术想表现的生活实在到什么样程度的问题，是不能由造型规则决定的。艺术永远是一种理想化；理想不同于实在——至少与柏拉图所说的影子的实在不同——但是理想化对于理解是必要的。

自然科学中不同概念集和艺术中的不同风格间的这种类比，在认为不同的艺术风格是人类精神颇为任意的产物的那种人看来，似乎是距真理很远的。他们会争辩说，在自然科学中这些不同的概念集代表客观实在，它们是自然传授给我们的，因而不可能是任意的，而是我们关于自然的实验知识日益增长的必然结果。大多数科学家会同意这些观点；但是艺术的不同风格是不是人类精神的任意产物呢？这里我们还是不要让笛卡儿分类引入歧途。艺术风格是由世界和我们本身之间的相互作用，特别是由时代精神和艺术家之间的相互作用产生的。一个时代的精神或许是和自然科学中任何事实同样客观的一种事实，但这种精神显示出世界的某些特征，这些特征甚至是与时代无关的，因而在这个意义上它们

是永恒的。艺术家试图通过他的工作，使这些特征成为可理解的，并且在这种尝试中，他形成了他从事创作的风格的造型。

由此可见，科学和艺术的两种过程，并非迥然不同。科学和艺术二者在许多世纪的历程中形成了人类的一种语言，用这种语言我们能够谈论实在的更为微小的部分，而各种概念的前后一贯的集和不同的艺术风格是这种语言中不同的词和词组。

第七章

相对论

在现代物理学的领域中，相对论一直起着很重要的作用。在这个理论中第一次认识到改变物理学中基本原理的必要。因此，对于相对论所提出并由它部分解决的那些问题的讨论，实质上属于我们对现代物理学的哲学涵意的探讨。在某种意义上可以这样说——与量子论相反——从最终认识解决那些问题的困难到相对论的建立只花费了很短一段时间。莫雷(Morley)和密勒(Miller)在1904年对迈克耳孙(Michelson)实验的重复，第一次确定地证明了不能用光学方法检测地球的平移运动，而爱因斯坦的决定性论文在其后不到两年时间就发表了①。在另一方面，莫雷和密勒的实验和爱因斯坦的论文只是很久以来就开始的发展中的最后几步，而这方面的发展可以用“运动体的电动力学”这个标题概括起来。

显然，自从电动机发明以来，运动物体的电动力学已经是物理学与工程学中的一个重要领域了。然而，麦克斯韦对光波的电磁本性的发现，给这个课题带来了严重的困难。这些波在一个主要

① 海森伯的这个说法不符合历史事实。事实上，迈克耳孙早于1881年就进行了关于以太漂移的实验，结果是检测不到地球相对于以太的运动。1887年，迈克耳孙和莫雷以足够的精密度重做了这个实验，所得结果依然一样。因此，没有理由可以认为直到1904年的莫雷和密勒的实验才“第一次确定地证明”这个结果。因此，“从最终认识解决那些问题的困难到相对论的建立”，中间不止经历了两年，而是经历了二十年左右的时间。相对论的建立并不是象海森伯所说的那样轻而易举。爱因斯坦说他自己在青年时代曾经为这个问题思索了十年。——译者注

特征上与别的波(例如声波)不同：它们能在似乎是虚空的地方传播。当在抽空了空气的容器中打铃时，声音不能传播到容器外面。但光却很容易穿过抽空了的空间。因此，人们假设，可以把光波看作是一种叫做以太的很轻的实体的弹性波，以太这种东西既看不到，也感觉不出来，但却充满于抽空的空间和存在着别的物质(例如空气或玻璃)的空间之中。关于电磁波本身可以是一种与任何物体无关的实在这种观念，当时的物理学家是没有想到的。既然以太这种假想实体似乎穿过了其他物质，就产生了这样的问题：当那些物质运动时，将发生什么？以太参与这种运动吗？如果参与的话，光波在运动的以太中是怎样传播的呢？

有关这个问题的实验由于下述理由而显得困难：运动物体的速度常常比光速小得多。因此，这些物体的运动只能产生很小的效应，这些效应同物体的速度与光速的比率成正比，或者同这个比率的更高次幂成正比。威耳孙(Wilson)、劳兰(Rowland)、伦琴(Roentgen)和爱欣瓦尔德(Eichenwald)以及斐索(Fizeau)所作的几个实验，能以相当于这个比率的一次幂的准确度测量出这些效应。1895年洛伦兹发展起来的电子理论能够十分令人满意地描述这些效应。但是，以后迈克耳孙、莫雷和密勒的实验开创了新的形势①。

对这个实验应该作比较详细的讨论。为了得到较大的效应，从而得到更准确的结果，看来最好用很高速度的物体来做实验。地球以大约20英里/秒的速度绕太阳运动。如果以太相对于太阳是静止的，并且也不随地球运动，那么，以太相对于地球的这种快

① 海森伯在这里把迈克耳孙、莫雷实验“开创的新形势”放在洛伦兹的电子论之后，这是把时间次序颠倒了。事实上，洛伦兹在1895年发表的著作中着重地提到了迈克耳孙在1881年和1887年的两次实验，而且为了解释这个实验的结果，早在1892年他已提出了“收缩”的假说(类似的假说，斐兹杰惹在洛伦兹之前就已作出了)。——译者注

速运动，将使它本身在光速的变化中被觉察出来。这时光的速度将因光是沿平行于还是垂直于以太的运动方向的方向传播而有所不同。即令有部分以太随地球运动，也应当有人们称为以太风的某种效应，而且这种效应大概与进行实验的地点的海拔高度有关。对预期的效应的计算表明，它应当是很小的，因为它同地球速度与光速的比率的平方成正比，因此人们必须从事非常精密的关于两条平行于或垂直于地球运动的光线的干涉的实验。这种类型的第一个实验，由迈克耳孙在1881年完成，但还不够准确。但是即使在以后几次重复这个实验，也没有些微征兆显示存在着预期的效应。特别是莫雷和密勒在1904年的实验可以看作是预期数量级的效应并不存在的确定的证明。

这个结果，虽然是很奇怪的，却与物理学家在以前曾经讨论过的另一个观点不期而合。在牛顿力学中成立的某种"相对性原理"可以描述如下：如果在某个参考系中物体的运动满足牛顿力学定律，那么在相对于这第一个参考系作匀速非转动运动的任何其他参考构架中，物体的运动也满足牛顿力学定律。或者换句话说，一个系统的匀速平移运动，归根到底并不产生任何力学效应，因而也不能通过这样的效应来观测。

这样一个相对性原理在光学和电动力学中可能不是正确的——在当时物理学家看来似乎是这样。如果第一个系统相对于以太是静止的，其他系统就不是静止的了，因此，它们相对于以太的运动应当通过迈克耳孙所考察的那一类效应被觉察出来。莫雷和密勒在1904年所作实验的否定结果复活了这种观念①，即这样的相对性原理在电动力学中也是成立的，就象在牛顿力学中一样。

① 莫雷和密勒1904年的实验结果同1887年迈克耳孙和莫雷的实验结果实质上没有很大区别。因此不能说是"复活……"。爱因斯坦当时并不知道1904年的实验。而且，爱因斯坦一再说过，迈克耳孙实验对于他创建相对论并没有发生多大作用。当时引起他注意的实验事实是斐索实验和光行差的观察。——译者注

另一方面，斐索在 1851 年所作的一个古老实验似乎肯定地和相对性原理相矛盾。斐索测量了运动液体中的光速。如果相对性原理是正确的，那么，光在运动液体中的合速度应当是液体速度和静止液体中的光速之和。但事实不是这样，斐索的实验表明，合速度还要稍为小一些。

所有想觉察“相对于以太”的运动的更新的实验的仍然得出否定的结果这一点，启示了当时的理论物理学家和数学家去寻找使光的传播的波动方程与相对性原理相协调的数学解释。洛伦兹在 1904 年建议了满足这些要求的数学变换。他曾不得不引入一个假说：运动物体在运动方向收缩了，其收缩程度与物体速度有关，并且在不同的参照方案中有不同的“表观”时间，它们在许多方面代替了“真实”时间。用这种方法，他能够表示某些类似于相对性原理的东西：光的“表观”速度在每个参照系中都是一样的。彭加勒(Poincaré)、斐兹杰惹 (Fitzgerald)和其他物理学家也曾探讨了类似的观念。

然而决定性的步骤是爱因斯坦在 1905 年的论文中作出的，他在论文中认定洛伦兹变换中的“表观”时间为“真实”时间，并废除了洛伦兹所谓的“真实”时间①。这是物理学本身基础的一个改变；一个未曾预料到的并且是非常根本性的改变，这种改变需要一个年轻的革命天才的全部勇气。人们要在自然的数学表示中采取这一步骤，只需要前后一致地应用洛伦兹变换就够了。但是由于它的新解释，空间和时间的结构改变了，对于物理学的许多问题就有了新的见解。例如，实体以太也可以废除了。既然所有彼此相对作匀速平移运动的参照系对于自然的描述都是等价的，说有这样一种实体以太，它仅仅在这些参照系当中的一个参照系内才是

① 事实上爱因斯坦当时还没有读到洛伦兹 1904 年的论文，因此他并不知道洛伦兹这一系列的论点。——译者注

静止的，那是没有什么意义的。这样一种实体事实上是不需要的，说光波在空虚的空间中传播，而电磁场本身是一种实在，能够在空虚的空间中存在，那就要简单得多了。

但是，决定性的变化是在时间和空间的结构方面。很难不用数学而只用普通语言来描述这种变化，因为通常“空间”和“时间”这两个词所表述的时间和空间结构，实际上是真实结构的一种理想化和过分的简化。但我们还必须尝试描述这种新结构，或许我们可用下面的方式来做到这一点。

当我们用“过去”一词时，我们包含了全部我们至少在原则上可以知道的和我们至少在原则上能够听别人说到的那些事件。类似地，我们用“未来”一词，包含了全部我们至少在原则上能够给予影响的、我们至少在原则上可以试图去改变或阻止的那些事件。一个非物理学家不容易理解，为什么“过去”和“未来”二词的这种定义是最为适用的。但是人们容易看出，这种定义很准确地符合于这两个词的日常用法。如果我们以这种方式使用这两个词，那么，从许多实验的结果我们知道，“未来”或“过去”的涵义并不依赖于观测者的运动状态或其他性质。我们可以说，它们的定义对于观察者的运动是不变的。这在牛顿力学中和爱因斯坦的相对论中都是正确的。

但是，这里有一个差别：在经典理论中，我们假设未来和过去是由一个我们可以称为现在的无限短的时间间隔所隔开的。在相对论中，我们已经知道情况是不同的：未来和过去是由一个有限的时间间隔所隔开的，这个时间间隔的长短与距观察者的距离有关。任何作用只能以小于光速或等于光速的速度传播。因此，一个观察者在一个给定瞬间可以既不知道也不影响到远处一点上在两个特定时刻之间发生的任何事件。其中一个时刻是为了使光信号在观察者观察的瞬间到达观察者处而必须从事件发生的地点发出光

信号的那个瞬间。另一个时刻是观察者在观察瞬间发出的光信号到达事件发生地点的瞬间。这两个瞬间之间的整个有限的时间间隔对于观察者说来都可以说是属于观察瞬间的“现在”。任何发生于这两个特定时刻之间的事件都可以说与观察动作是“同时”的。

用“可以说是”这种说法，表明了“同时”一词的意义含糊不清，这是由于“同时”这个词是从日常生活经验中形成的，而在日常生活中光速总可以当作是无限大的。实际上这个词在物理学中也能以稍稍不同的方式来定义，而且爱因斯坦在他的论文中也使用了这第二种定义。当两个事件在空间中同一点上同时发生，我们说它们重合，这个词是毫无歧义的。现在让我们设想空间中一条直线上有三个点，中间一点到两旁两个点的距离是相等的。如果在外面两点有两个事件发生于这样的时刻，使得从这两个事件发出的光信号到达中间点时相重合，那么，我们可以定义这两个事件是同时的。这个定义比第一个定义要狭窄一些。它最重要的后果之一是当两个事件对一个观察者是同时的，它们对另一个观察者可以不是同时的，如果他对第一个观察者作相对运动的话。两个定义之间的联系可用下面的陈述确定下来：如果两个事件在第一种意义上是同时的，那么，人们总可以找到一个参照构架，使得这两个事件在这个参照构架中，在第二种意义上也是同时的。

“同时”这个词的第一个定义似乎更接近于日常生活的用法，因为两个事件是否同时的问题在日常生活中并不依赖于参照构架。但是在两个相对论性的定义中，这个词已经获得了日常生活语言所缺乏的严密性。在量子论中，物理学家必定早已就懂得经典物理学术语只能不准确地描述自然，它们的使用受量子定律的限制，因而人们在使用它们时应当小心。在相对论中，物理学家曾经试图改变经典物理学中词的涵义，使得那些术语更为准确，使它们能符合于自然中的新状况。

由相对论所揭示的空间和时间结构给物理学的各个部门带来许多后果。运动物体的电动力学能立即从相对性原理导出。这个原理本身能够构成一个十分普遍的自然律，它不只涉及电动力学或力学，而是涉及任何一类定律：在一切仅因彼此相对作匀速平移运动而有所不同的参照系中，这些定律都取同样的形式；它们对于洛伦兹变换是不变的。

或许相对性原理的最重要后果是能量的惯性，也就是质量和能量的等价性。因为光速是任何物体永不能达到的极限速度，不难看出，要加速一个已经很快地运动着的物体比加速一个静止物体更困难。惯性随动能的增加而增加了。但是，按照相对论，任何一种能量都将毫无例外地对惯性作出贡献，也就是对质量作出贡献，而属于一定量能量的质量正是这个能量除以光速的平方。由此可见，每一种能量都带有质量；但即令是颇大的能量也只带有很小的一份质量，这正是以前未曾发现质量和能量之间有联系的原因。质量守恒律和能量守恒律①失去了它们的单独的有效性，两者结合成为一个单一的定律，它可以称为能量也就是质量守恒律。五十年前，当相对论刚刚建立时，质量和能量等价性这个假说似乎是物理学中的彻底革命，但关于这个假说只有很少的实验证据。在现在，我们在许多实验中看到基本粒子能够怎样地从动能产生，以及这些粒子如何湮灭而成为辐射；因此，能量转换为质量和质量转换为能量并未提出什么不寻常的东西。原子爆炸中能量的大量释放是爱因斯坦方程的正确性的另一个更为惊人的证明。但我们可以在这里补充一点批判性的历史评论。

时常有人说，原子爆炸的巨大能量是由于质量直接转化为能量，并且只有根据相对论，人们才能预计这些能量。然而，这是一种误解。原子核中可利用的巨大能量早在贝克勒耳、居里和卢瑟

① 原文误为电荷守恒律，此处已改正。——译者注

福的放射性衰变的实验中就已经知道了。任何象镭一样的衰变物质产生的热量差不多比同等数量的质料在化学变化过程中释放的热量大一百万倍。铀的裂变过程中的能源正好和镭的 α 衰变中的能源相同，就是说，主要是原子核分裂而成的两部分之间的静电斥力。因此，原子爆炸的能量是直接出自这个来源，而不是从质量转换为能量得到的。具有有限的静止质量的基本粒子的数目在爆炸中并未减少。但是，原子核中基本粒子的结合能确实在它们的质量上反映出来，因而能量的释放也以这种间接的方式和原子核质量的变化相联系。质量和能量的等价性，除了它在物理学中的重要性外，也提出了一些涉及非常古老的哲学问题的问题。实体或物质不灭曾经是过去好几个哲学体系的命题。然而，在现代物理学中，许多实验已经证明，基本粒子，例如正电子和电子，能够湮灭并转变成为辐射。这是否意味着这些较古老的哲学体系已为现代经验所否定，而早期哲学体系所作的论证是误人的？

这当然是一个轻率和不公正的结论，因为在古代和中世纪时代的哲学中，"实体"和"物质"等词不能和现代物理学中的"质量"一词简单地等同起来。如果希望用古老的哲学语言来表示我们现代的经验，人们可以把质量和能量当作同一"实体"的两种不同的形式，从而保持实体不灭的观念。

另一方面，很难说用古老语言表达现代知识能有多少收获。过去的哲学体系是在它们那个时代全部有用知识的基础上形成的，是沿着得到这些知识的思想路线形成的。当然，我们不应当要求千百年前的哲学家预见到现代物理学或相对论的发展。因此，很久以前哲学家从智力探讨过程中所形成的概念可能不适合于那些只能用现代精密技术工具去观测的现象。

但在进入相对论的哲学涵义的讨论之前，必须先叙述它的进一步发展。

假想的实体“以太”，它在十九世纪麦克斯韦理论的早期讨论中曾经起过如此重要的作用，已经——如前所述——被相对论废除了。有时，这用绝对空间观念被放弃了的说法来表达。但是，这样一种陈述必须十分小心地来接受。确实，人们不能指出一个具体的参照系，其中的实体以太是静止的，因而它配得上绝对空间的称号。但如果说空间在现在已失去了它的全部物理性质，那就错了。物体或场的运动方程在“正常”参照系中所取的形式与在另一个相对于“正常”参照系旋转的或作非匀速运动的参照系中所取的形式仍然是不同的。在旋转系中离心力的存在证明了——仅就1905和1906年的相对论而言——空间的物理性质的存在，这种性质使区别旋转系与非旋转系成为可能。

从哲学观点看来，这似乎不能令人满意，从哲学观点看来，人们宁愿将物理性质只附加在如物体或场这种物理实体上，而不附加在空虚的空间上。但就有关的电磁过程理论或机械运动而论，这种空虚空间的物理性质的存在不过是对一些不容争辩的事实的一种描述。

差不多十年以后，在1916年，对这种状况的仔细分析，引导爱因斯坦对相对论作了很重要的推广，这种推广通常称为“广义相对论”①。在描述这种新理论的主要观念之前，稍稍谈一谈我们能够信赖相对论这两个部分的正确性的可靠程度会是有用的。1905和1906年的理论是以很大量充分确定的事实为根据的，这些事实是：迈克耳孙和莫雷实验以及许多类似的实验，无数放射过程中的质量和能量的等价性，放射性物体的寿命对它们的速度的依赖关系，等等。因此，这个理论是现代物理学的坚固基础，在我们目前情况下是不容争辩的。

① 爱因斯坦完成广义相对论的创建时间是在1915年，不过在1916年他发表了关于广义相对论的第一篇完整的总结性论文《广义相对论的基础》。——译者注

对于广义相对论，实验证据就远远不能令人信服，因为实验材料十分稀少。只有少量的天文观测可以对假设的正确性进行检验。因此，这整个广义相对论比起狭义相对论来，就具有更大的假说性了。

广义相对论的基石是惯性和引力之间的联系。非常仔细的测量已经证明，作为引力的来源的物体质量准确地正比于作为物体惯性的度量的质量。即使最准确的测量也从未显示过对这个定律的任何偏离。如果这个定律是普遍地正确的，那么，可以把引力等价于离心力或其他因惯性反应而出现的力。因为如前面所述，必须把离心力归因于空虚空间的物理性质，爱因斯坦就转向把引力也归因于空虚空间的物理性质的假说。这是很重要的一个步骤，它对同样重要的、接踵而至的第二个步骤是必需的。我们知道，引力是由质量所引起。如果引力是和空间的性质相联系的，那么，这些空间性质就必须是由质量所引起或受它的影响的。旋转系中的离心力必定是由大概是很远的质量（相对于这个系统）的旋转所引起。

为了实现以这寥寥数语概括出来的纲领，爱因斯坦必须把基本的物理观念和黎曼(Riemann)所建立的一般几何学的数学方案联系起来。因为空间的性质似乎连续地随引力场而变化，它的几何学就必须与曲面几何学相类似，此时，欧几里得几何学的直线必须被最短程线、即最短距离的线所代替，同时，曲率是连续地变化的。作为最后的结果，爱因斯坦能够给出质量分布与几何学的决定性参数间的联系的数学形式系统。这个理论确实表示出关于引力的常见事实。它在很高的近似程度上等价于引力的传统理论，并且还进一步预言了少数有趣的、正好处于可测量的极限的效应。例如，引力对光的作用。当单色光从一个很重的恒星发出时，光量子在离开恒星的引力场时会损失一些能量，从而发生了发射谱线

的红移。关于这样的红移目前尚没有实验的证明，弗罗恩特利希(Freundlich)对实验所作的讨论清楚地表明了这一点。但就此作出爱因斯坦的结论与实验相矛盾的结论也为时过早。经过太阳附近的光束应当为太阳的引力场所偏转。弗罗恩特利希已从实验发现了适当数量级的偏转；但这个偏转是否与爱因斯坦理论所预言的数值定量地符合，尚不能决定。广义相对论正确性的最好的证据，似乎是水星的轨道运动的进动，它显然很好地符合于这理论所预言的数值。①

虽然广义相对论的实验基础还很狭小，但理论却包含了一些极为重要的思想。从古代希腊到十九世纪这整个时期内，数学家都认为欧几里得几何是显而易见的；欧几里得的公理被当作任何数学几何的基础，而且是一种不容争辩的基础。以后，在十九世纪，数学家波利亚(Bolyai)和洛巴切夫斯基(Lobachevsky)、高斯(Gauss)和黎曼发现，可以创建另外一些几何学，它们能象欧几里得几何学一样，以同样的数学严密性建立起来；因此，究竟哪一种几何学是正确的问题，就变成一个经验问题。但是，只有通过爱因斯坦的工作，问题才真正由物理学家承担起来。广义相对论中讨论的几何学不仅是关于三维空间，而是关于由时间和空间组成的四维簇的几何学。广义相对论建立了这种四维簇的几何学和宇宙中质量分布的关系。因此，这个理论以全新的形式提出了时间和空间在最大尺度上的性状这些老问题；它能够提出可通过观测来检验的可能答案。

因此，自从科学和哲学的最早时期就引人注意的一些很古老的哲学问题又被捡起来了。空间是有限的还是无限的？在时间开始之前有什么？在时间终了时又将发生什么？或者时间是无始无

① 六十年代关于雷达波传播中的时间延迟的实验以及1978年发表的关于引力波存在的间接证据为广义相对论提供了新的证据。——译者注

终的？这些问题在不同的哲学中和宗教中曾经找到不同的答案。譬如，在亚里士多德的哲学中，整个宇宙空间是有限的（虽然它是无限地可分的）。空间是起因于物体的广延，它与物体相联系；没有物体也就没有空间。宇宙由地球、太阳和星球所组成，即由有限个数的物体所组成。在星球范围之外没有空间；因此，宇宙空间是有限的。

在康德哲学中，这个问题属于他称为"二律背反"的问题——即不能回答的问题，因为两种不同的论证可以导致相反的结果。空间不能是有限的，因为我们不能设想空间有一个边界；对于我们所到达的空间的任一点，我们总能够设想我们还能跨越过去。同时空间又不能是无限的，因为空间是我们能够设想的东西（否则"空间"一词就不会形成），而我们不能设想一个无限的空间。关于这第二个命题，这里没有逐字逐句地重复康德的论证。"空间是无限的"这句话对于我们意味着某些否定性的东西；即我们不能到达空间的终点。对于康德来说，这意味着空间的无限性确实是规定了的，这无限性在我们很难再现的意义上"存在"着。康德的结论是：对于空间是有限还是无限这个问题，不能给出合理的答案，因为整个宇宙不能成为我们的经验的对象。

关于时间的无限性问题，可以看到类似的情况。例如，在圣奥古斯丁（St. Augustine）的《忏悔录》（*Confessions*）中，这个问题取如下的形式：在上帝创造世界之前，他在干些什么？奥古斯丁不满足于这种玩笑："上帝在忙于为那些提傻问题的人准备地狱呢。"他说，这样一种回答太浅薄了，他试图对这个问题作一合理的分析。时间仅仅对于我们是在不断地消逝；我们所期待的时间是"未来"；正在过去的时间是"现在"，我们所回忆的时间是"过去"。但上帝不在时间之中，对于上帝，千年如一日，一日犹千年。时间是和世界一同被创造出来的，它属于世界，因此时间并不在宇宙存在之前

存在。对于上帝，整个宇宙过程是一次给定的。在他创造世界之前没有时间。显然，在这样的陈述中，“创造”一词立刻引起了全部主要的困难。这个词，如通常所理解，意味着某些过去没有的东西产生了，而在这个意义上，它预先假设了时间的概念。因此，不能用合理的术语规定“时间已被创造出来”一句话的意义是什么。这个事实又提醒我们从现代物理学中学到的一个时常讨论的教训，它就是：每一个词或概念，尽管它可能看来很清楚，也只能在有限范围内适用。

在广义相对论中，关于时间与空间的无限性这些问题，能够在经验基础上提出问题并作部分回答。如果理论正确地给出了时间空间四维几何学与质量在宇宙中分布之间的联系，那么，对空间中星系分布的天文观测将给予我们关于整个宇宙的几何学的信息。至少人们能够建立宇宙的“模型”，即建立宇宙学图象，它的结论能够同经验事实相比较。

根据现有的天文学知识，不能肯定地在几种可能的模型之间作出判别。宇宙所充塞的空间也许是有限的。这并不意味着宇宙在某个地方有一个尽头。它可能只是意味着朝着宇宙的一个方向前进又前进，人们最后将回到他们出发的地点。这种状况类似于地球表面的二维几何学，在地球上，当我们从一点向东方出发，最后将从西方回到这一点。

对于时间，似乎有某种类似于起点的东西。许多观测指出宇宙起源于大约四十亿年前；至少它们似乎证明在那时，宇宙的全部物质集中于较现在小得多的空间之内，并且一直以不同的速度从这个小空间向外膨胀。从许多不同的观测（例如，从陨石的年龄、地球上矿物的年龄等等），发现了同样的四十亿年，因此，很难找到一个本质上不同于宇宙有一个起源这种观念的解释①。如果它是

① 现代天文学已证明有些恒星的寿命已超过一百亿年。——译者注

正确的，就可能意味着在这个时间之外时间的概念将遭受根本的变化。在天文观测目前的状况下，关于大尺度的时间空间几何学的问题还不能作任何程度的确定的回答。但想到对这些问题最终可能在坚实的经验基础上作出回答，那是极为有趣的。当前，即令是广义相对论，也是建立在一个很狭窄的实验基础上，并且必须认为它比用洛伦兹变换表示的所谓狭义相对论要靠不住得多。

即使人们限制进一步讨论广义相对论，但毫无疑问，相对论诚然已经深深地改变了我们对时间空间结构的观点。这些变化的最激动人心的方面或许不在于它们的特殊性质，而是在于这些变化已成为可能这一事实本身。牛顿所定义的成为他对自然作数学描述的基础的时间和空间结构是简单而前后一致的，并且十分密切地符合于日常生活中所用的时间和空间概念。事实上这种符合是如此密切，以致牛顿的定义可以认为是这些日常概念的准确的数学形式化。在相对论之前，事件按照时间排成序列而与它们空间中的位置无关，这似乎是十分明显的。我们现在知道，这种印象是在日常生活中，由于光速比实际经验中碰到的任何其他速度大得多这一事实而产生的；但是这个限制在当时当然没有被认识到。并且即使我们现在知道了这种限制，我们也仍然很难想象，事件的时间序列应当与它们的位置有关。

康德的哲学后来集中注意时间和空间概念属于我们与自然的关系而不属于自然本身这一事实；集中注意我们不用这些概念就不能描述自然的事实。因此，这些概念在某种意义上是“先天的”，它们是经验的条件，而根本不是经验的结果，而且一般都相信，它们不会受到新的经验的触犯。因此，改变这些概念的必要性的出现，就象是一次巨大的奇袭。科学家这才第一次知道，他们在将日常生活概念应用到现代实验科学的精密经验中去时，必须何等地小心谨慎。即令在牛顿力学的数学语言中建立了这些概念的准确

和前后一致的形式系统，或者在康德的哲学中对它们作了仔细的分析，也不能保护它们免受绝顶准确的测量所可能作出的批判性分析。后来证明，这个警告在现代物理学的发展中非常有用，并且，假如没有相对论警告物理学家不要不加批判地使用来自日常生活和经典物理学的概念，假如相对论没有取得成功，那么，要理解量子论当然将更为困难。

第 八 章

对量子论的哥本哈根解释的批评和反建议

量子论的哥本哈根解释已经引导物理学家远远离开了盛行于十九世纪的自然科学中的朴素的唯物主义观点。因为这些观点不仅与那时的自然科学有着本质的联系，而且也在若干哲学体系中作了系统的分析，并且还深深地渗入了甚至一般市民的心灵之中，所以很容易理解，为什么有那么多人作了批评哥本哈根解释的尝试，为什么会有那么多的人企图用更符合于经典物理学的概念或唯物主义哲学的解释来代替哥本哈根的解释。

这些尝试可以分为三个不同的派别。第一派并不想在实验结果的预测方面改变哥本哈根解释；但它企图改变这种解释的语言，以便使它更类似于经典物理学。换句话说，它试图改变哲学，而不改变物理学。这一派的若干论文把他们对哥本哈根解释的实验预测的赞同仅限于所有今天已经实现的或属于普通电子物理学的那些实验。

第二派认为，哥本哈根解释只是一个适当的解释，如果实验结果处处与这种解释的预测相符合的话。因此，这一派的论文试图在某些临界点上，把量子论作某种程度的改变。

最后，第三派表示了它对哥本哈根解释、特别是它的哲学结论的普遍不满，而没有作出明确的反建议。爱因斯坦、冯·劳埃(Von Laue)和薛定谔就属于这第三派，这一派从历史上讲是三派中的最早的一派。

然而，所有哥本哈根解释的反对者在一个论点上都是一致的。在他们看来，回到经典物理学的实在概念，或者用一个更普通的哲学术语来讲，回到唯物主义的本体论，那是值得想望的。他们宁愿回到一个客观的实在的世界的观念，这个世界的最小部分，就象石头和树木一样，是客观地存在着的，与我们是否观测它们无关。

然而，如我们在前几章所曾讨论过的，由于原子现象的本质，这是不可能的，至少是不完全可能的。我们的任务不应该是去阐述关于原子现象应当是怎样的那些愿望；我们的任务只能是去理解它们。

当人们分析第一派的论文时，重要的是从一开始就要认识到，他们的解释不能为实验所推翻，因为他们只是以不同的语言重复了哥本哈根的解释。按照严格的实证论观点看来，人们甚至可以说，我们这里所碰到的不是哥本哈根解释的反建议，而却是以不同语言表达出来的这种解释的严格的重述。因此，人们只能在这种语言的适用性方面发生争论。有一些反建议运用了"隐参量"的观念。因为量子论的定律一般只是统计地决定一个实验结果，从经典立场出发，人们会倾向于设想存在某些"隐参量"，它们在任何通常的实验中都观测不到，但它们以正常的因果方式决定着实验的结果。因此，有些论文就试图在量子力学的框架中构成这样的参量。

例如，玻姆(Bohm)已沿着这条路线对哥本哈根解释提出了反建议。最近，德布罗意也在某种程度上采纳了这种见解。玻姆的解释已经详细地作出。因此，这里可以拿它作为讨论的基础。玻姆把粒子看作是"客观实在的"结构，就象牛顿力学中的质点一样。位形空间中的波在他的解释中也是"客观实在的"，就象电场一样。位形空间是牵涉到属于系统的全部粒子的不同坐标的一个

多维空间。这里我们遇到了第一个困难：说位形空间中的波是"实在的"，究竟是什么意思？这个空间是一个很抽象的空间。"实在的"一词起源于拉丁字"res"(实体)，它的意思是"物"；但物是存在于通常的三维空间中，而不是存在于抽象的位形空间中的。当人们想说位形空间中的波与任何观测者无关时，人们可以说这些波是"客观的"；但人们很难说它们是"实在的"，除非人们甘愿改变这个词的含义。玻姆进一步规定恒波相面的法线是粒子的可能轨道。按照他的想法，这些法线中哪一条是"实在的"轨道取决于系统和测量仪器的历史，并且如果对系统与测量仪器的了解不比实际上能了解的更多的话，"实在的"轨道就无法确定。这种历史实际上包含了隐参量，它就是实验开始以前的"实际"轨道。

如泡利(Pauli)所强调指出的，这种解释的一个结果是：许多原子中的一些基态电子应当是静止的，不环绕原子核作任何轨道运动。这似乎和实验相矛盾，因为对基态中电子速度的测量(例如，用康普顿效应的方法)，总是显示出基态中有一个速度分布，它由动量空间或速度空间中的波函数的平方所给出——这符合于量子力学定则。但是，这里玻姆能够辩解说，这时测量已经不能再用普通定律来估算了。他同意测量的正常估算确实会得出速度分布；但当考虑到关于测量仪器的量子论——特别是由玻姆在这方面引入的某些奇特的量子势时，那么，电子老是"实在地"静止着的陈述是讲得通的。在粒子位置的测量中，玻姆认为实验的通常解释是正确的；而在速度测量中，他拒绝了通常的解释。以此为代价，玻姆认为他自己有权利主张："我们不必在量子论的领域中放弃单个系统的准确、合理和客观的描述。"然而，这种客观描述本身却象是一种"意识形态的上层建筑"，它与直接的物理实在关系很少；因为如果量子论保持不变的话，玻姆解释中的隐参量就是永远不能在实在过程的描述中出现的那样一种东西。

为了避免这种困难，玻姆实际上表达了这样一个希望：将来在基本粒子的领域的实验中，隐参量可能会起一部分物理作用，而量子论将因此被证明为错误的。在讲到这样一些奇怪的希望时，玻尔常常说它们在结构上就象是这样的一些句子："我们可以希望以后会证明有时 $2\times2=5$，因为这对我们的财务大有好处。"实际上玻姆希望的满足，将不仅从下面挖掉量子论的基础，并且也挖掉了玻姆解释的基础。当然，同时也必须强调指出，刚才所说的类比，虽然十分恰当，但并不表示将来象玻姆所建议的那样来改变量子论的论证，在逻辑上也是行不通的。因为这不是根本不可想象的，譬如说，未来数理逻辑的扩展，可能给在特殊情况下 $2\times2=5$ 这样的陈述以某种意义，并且这种扩展了的数学甚至可能在经济领域的计算中得到应用。然而，即使提不出令人信服的逻辑根据，我们实际上仍相信，数学中这样的变化在财务上对我们也毫无帮助。因此，很难理解，玻姆的著作所指出的那些可能实现他的希望的数学倡议如何能够用来描述物理现象。

如果我们不顾量子论的这种可能变化，那么，玻姆的语言，如我们所已指出的，在物理学方面没有谈到任何与哥本哈根解释有所不同的东西。于是，留下来的只是这种语言的适用性问题。在谈到粒子轨道时，我们已碰上一种多余的"意识形态的上层建筑"，除了前面所作的反驳外，这里还必须特别指出，玻姆的语言破坏了量子论中隐含的位置与速度间的对称性；关于位置的测量，玻姆接受了通常的解释，关于速度和动量的测量，他否定了它。因为对称性常常构成一个理论的最主要的特征，所以很难看出，在对应的语言中忽略了它们，能得到些什么。因此，人们不能认为，玻姆对哥本哈根解释的反建议是一种进步。

对于玻普(Bopp)和芬尼斯(Fenyes)(沿着稍微不同的路线)所建议的统计解释，能够以稍微不同的形式提出类似的反对意见。

玻普认为粒子的产生或湮灭是量子论的基本过程，粒子在词的经典意义上、在唯物主义本体论的意义上是“实在的”，而量子论定律被看作是这样一些产生与湮灭事件的相关统计法的特殊例子。这个解释包含了量子论数学定律的许多有意思的注释，它能够以这样一种状态出现，就是在物理学的结果方面，它能推导出与哥本哈根解释完全相同的结论。只要是这样，在实证论的意义上，它和玻姆的解释一样，与哥本哈根解释是同型的。但在它的语言中，它破坏了粒子与波之间的对称性，而这种对称性是量子论数学方案的独特的特征。早在1928年，约尔丹(Jordan)、克莱因(Klein)、维格纳(Wigner)已经证明，不仅能够把数学方案解释为粒子运动的量子化，而且也能把它解释为三维物质波的量子化，因此，没有理由认为这些物质波要比粒子不实在。只有当对于空间和时间中的物质波建立起对应的相关统计法，并且把究竟是粒子还是波应当被看作是“现实的”实在这个问题搁在一边时，波与粒子之间的对称性在玻普的解释中才能够得到保证。

在唯物主义本体论的意义上认为粒子是实在的这个假设，总是引诱人们认为“根本上”有可能背离测不准原理。例如，芬尼斯说:“测不准原理(他把它和某种统计关系联系起来)的存在，决不意味着以任意准确度同时测定位置和速度是不可能的。”然而，芬尼斯并没有叙述这样的测量在实践上应当如何实现，因此他的考虑仍象是一种抽象的数学。

瓦采耳(Weizel)对哥本哈根解释的反建议与玻姆和芬尼斯的反建议是相似的。他将“隐参量”与专门引入的、没有办法观察到的新型粒子“零子”(zeron)联系起来。然而，这样一种概念陷入了一种危险，那就是实在的粒子和零子间的相互作用会消耗零子场的许多自由度中的能量，以致给整个热力学造成混乱。瓦采耳未曾解释过他希望怎样来避免这种危险。

通过回忆关于狭义相对论的类似讨论来说明前面所说的所有论著的立场，或许是最好不过的了。凡是不满意爱因斯坦否定以太、否定绝对空间和绝对时间的人都能发表如下的议论：狭义相对论无法证明绝对空间和绝对时间是不存在的。它只表明了，在任何通常实验中，真正的空间和真正的时间并不直接地出现；但是如果正确地考虑到自然律的这个方面，从而在运动坐标系中引入正确的"表观"时间，那就没有理由反对绝对空间的假设了。甚至假设我们的银河系的重心在绝对空间中是静止的(至少是近似地静止的)，也是说得通的。狭义相对论的批评家还可以补充说：我们可以希望未来的测量将允许无歧义地定义绝对空间(即定义相对论的"隐参量")，这样相对论就会被驳倒。

立即可以看出，这种议论不能为实验所驳倒，因为这种议论并没有提出任何不同于狭义相对论的论断。然而，这样一种解释会在所使用的语言上破坏对相对论的具有决定意义的对称性，即洛伦兹不变性，因而必须认为这种解释是不妥当的。

很明显，这与量子论很相类似。量子论的定律是这样的，它使得专门创造的"隐参量"永远不能被观测到。如果我们把这些隐参量作为一种虚构的东西引进量子论的解释，那么，那些有决定意义的对称性也就遭到了破坏。

布洛欣采夫(Blochinzev)和亚历山德罗夫(Alexandrov)的著作在问题的陈述方面与前面讨论过的那些著作完全不同。这两位作者一开始就明确地把他们对哥本哈根解释的异议限制在问题的哲学方面。他们无保留地接受了这种解释的物理学。

然而，论战的表面形式却是如此尖锐，布洛欣采夫在他的引言中写道："在当代物理学的各种唯心主义倾向中，所谓哥本哈根学派是最反动的。本文是要尽力揭露这个学派在量子物理学的基本问题上的唯心主义的和不可知论的投机。"论战的辛辣表明我们

在这里不仅要和科学打交道，而且还要和信仰的表白打交道，要和对某种信条的固守态度打交道。文章的末尾引用了列宁的著作以表明其目的："不管没有重量的以太变成有重量的物质和有重量的物质变成没有重量的以太，从'常识'看来是多么稀奇；不管电子除了电磁的质量外就没有任何其他的质量，是多么'奇怪'，不管力学的运动规律只适用于自然现象的一个领域并且服从于更深刻的电磁现象规律，是多么奇异，等等，——这一切不过是再一次证实了辩证唯物主义。"① 后面这句话似乎已使得布洛欣采夫关于量子论和辩证唯物主义哲学的关系的讨论减少了意义，因为他已把这一讨论降低成一种戏剧性的审判，而在这个审判中，判决词还在审判开始以前就已经知道了。然而，彻底弄清布洛欣采夫和亚历山德罗夫所发表的论据仍然是重要的。

这里，由于他们的任务是在拯救唯物主义本体论，他们主要反对的是把观察者引入到量子论的解释中来。亚历山德罗夫写道："因此，我们必须了解，在量子论中，'测量结果'只是电子和适当客体的相互作用的客观效果。关于观察者的陈述必须加以避免，而我们必须处理的是客观条件和客观效果。一个物理量是现象的一个客观特征，而不只是一种观测结果。"根据亚历山德罗夫的意见，位形空间中的波函数表征了电子的客观状态。

亚历山德罗夫在他的表述中忽略了这样一个事实，即量子论的形式系统不容许有与经典物理学相同的客观化程度。例如，根据量子力学，如果一个系统和测量仪器的相互作用是作为一个整体来处理的，并且如果把两者都看作是和世界的其余部分相隔绝的，那么，量子论的形式系统一般并不能得出肯定的结果；例如，它不能得出照相底片将在一个既定点变黑的结论。如果人们试图拯救

① 列宁：《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社，1961年版，第276页。——译者注

亚历山德罗夫的"客观效果"，说照相底片在作用后"确实"在一定点变黑了，那么，答辩是：由电子、测量仪器和照相底片组成的闭合系统的量子力学处理不再适用了。能用日常生活概念描绘的事件的"确实的"特性，在没有进一步说明的情况下，是不包含在量子论的数学形式系统之中的，它是通过引入观察者才在哥本哈根解释中出现的。当然，观察者的引入不能误解为暗示要把某种主观特征带进自然的描述之中。说得更恰当一些，观察者只有记录测定结果的功能，即记录空间和时间中的过程的功能，至于观察者是一个仪器还是一个人，那倒没有什么关系；但是，记录，即从"可能"转变到"现实"，在这里是绝对必要的，不能从量子论的解释中略去。在这一点上，就观测的每个动作本质上都是一种不可逆过程来说，量子论和热力学有内在的联系；只有通过这样的不可逆过程，量子论的形式系统才能和空间和时间中的实际事件前后一致地联系起来。而且，不可逆性——当纳入现象的数学表示时——是观察者对系统的知识不完全所引起的，就这一点而论，它不是完全"客观的"。

布洛欣采夫对问题作了稍稍不同于亚历山德罗夫的表述："在量子力学中，我们所描述的不是粒子本身的状态，而是粒子属于这个或那个统计系综的事实。这个从属关系是完全客观的，并且不依赖于观察者所作的陈述。"然而，这种表述会使我们远离——或许太远了——唯物主义本体论。为了弄清这一点，回忆一下这种对统计系综的从属关系如何应用于经典热力学的解释是有用的。如果一个观察者已经测定了系统的温度，并希望从他的结果得出关于系统中分子运动的结论，他可以说这个系统正好是从一个正则系综取出的一个抽样，因而他可以认为它可能有几个不同的能量。"在现实中"，——在经典物理学中我们可以这样作结论——系统在既定的一个时间只有一个确定的能量，而不可能得到其他

值。如果观察者认为在那个时刻可能有不同的能量值，他一定是被欺骗了。正则系综不仅包含了关于系统本身的陈述，而且也包含了观察者对系统的不完全知识。如果布洛欣采夫试图在量子论中把一个系统对一个系综的从属关系说成是“完全客观的”，他所用的“客观的”一词同经典物理学中的意义就有所不同。因为在经典物理学中，如前所述，这个从属关系不仅意味着关于系统本身的陈述，而且也是关于观察者的知识程度的陈述。对于量子论中这个论断必须指出一个例外。如果在量子论中，系综只是由位形空间中的一个波函数来表征(而不是如通常那样由一个矩阵来表征)，我们就遇到一种特殊情况(所谓“纯粹情态”)，在这种情况下，描述在某种意义上可以称为客观的，并且知识不完全的因素不直接在那里出现。但是因为每种测量(由于它的不可逆特征)重新引入了知识不完全的因素，因而情况仍没有什么根本的不同。

尤其重要的，从这些表述中我们看到，当我们试图把新观念塞进一种属于早期哲学的旧的概念系统——或者，用一句古老的隐喻来说，当我们试图用旧瓶装新酒时——那是多么的困难。这样一些努力永远是令人苦恼的，因为它们将把我们引导到忙于应付旧瓶的接二连三的破裂，而无暇去品味新酒。我们不能期望一世纪以前那些提出辩证唯物主义的思想家会预见到量子论的出现。他们的物质和实在概念不可能适合于今天日益精巧的实验技术的结果。

关于科学家对一种特殊信仰的态度问题。或许人们在这里应当加几句一般性的评论；这种信条可以是宗教的或者政治的信条。宗教信条和政治信条之间的基本区别——后者涉及到我们周围世界的直接的物质实在，而前者以物质世界之外的另一个实在为对象——对于这个特殊问题并不重要；问题是在于信条本身。根据前面所述，人们或许会倾向于要求科学家决不要信赖一种特殊的

教义，决不要把他的思想方法局限于一种特殊的哲学。他应当时刻准备着让他的知识基础为新的经验所改变。但这种要求又是我们生活状况的过分简化，其理由有二。第一，我们的思想结构在我们的青年时代就已经由那时我们接触到的观念或者我们求教的重要人物所决定了。这种思想结构将构成我们今后全部工作的中枢部分，并且它会使我们在以后难以适应完全不同的观念。第二个理由是我们属于一个社会或一个集团。这个社会是由共同的思想、共同的伦理标准、或人们谈论一般生活问题的共同语言联系在一起。共同思想可能为教会、政党或国家的权威所支持，即使不是如此，要违背这些共同思想而不与社会相冲突也还是困难的。然而，科学思考的结果可能和某种共同思想相矛盾。当然，一般地要求科学家不应当是他的社会的忠诚的成员，那是不明智的，因为要是那样，他就可能被剥夺掉从他所属的那个社会能够得到的幸福；然而盼望那些从科学观点看来总是简单化了的社会集团的共同思想会随着科学知识的进展而立即改变，同样也是不明智的，因为要是那样，这些共同思想就得象科学理论一样一定必须是可变的。因此，在这一点上，我们在今天甚至又回到了充满整个中世纪后期基督教历史的"双重真理"的老问题。有这样一种很可争论的教义，说什么"真正的宗教——不管它取什么形式——是人民群众不可缺少的需要，而科学人物所寻找的是宗教后面实在的真理，并且只能在那儿寻找这种真理。"它还这样说："科学是秘传的，它只是为少数人的。"如果在我们的时代，政治学说和社会活动在某些国家中扮演了真正宗教的角色，问题本质上仍然相同。科学家的第一个要求永远是理智的诚实，而社会却常常要求科学家——鉴于科学的可变性——在他公开发表他的反对真正宗教的意见以前，至少得等待二、三十年。关于这个问题，如果单单靠忍耐还不够的话，或许就没有简单的解决办法了；但是，这无疑是属于人类生活的老

问题，这个事实可能给我们某种安慰。

现在回到对量子论的哥本哈根解释的反建议。我们必须讨论第二派的建议了，这一派的建议试图改变量子论，以便作出不同的哲学解释。在这个方向上，雅诺西(Janossy)作出了最谨慎的尝试，他认识到了量子力学的严格有效性迫使我们背离经典物理学的实在概念。他因此企图把量子力学作这样的改变，使得许多结果仍然保持正确，但它的结构却接近经典物理学。他的着手点是所谓“波包的收缩”，即当观察者去认识测量结果时，波函数，或者更一般地讲，几率函数发生不连续的变化。雅诺西注意到这种收缩不能从数学形式系统的微分方程推导出来，他相信他能从这里作出结论说，在通常的解释中有自相矛盾的地方。如所周知，当从可能到现实的转变完成时，“波包的收缩”总是在哥本哈根解释中出现。由于实验得出一个确定的结果，由于实际上发生了一个确定的事件，其可能性的范围扩展得很广的几率函数就立即收缩到很窄的范围。在数学形式系统中，这种收缩要求所谓几率的干涉(这是量子论的最有特征性的现象)会被系统同测量仪器以及世界其余部分之间的部分不确定的和不可逆的相互作用所破坏。雅诺西现在试图在方程中引入所谓阻尼项以改变量子力学，这样，在有限时间以后，干涉项自行消失了。即令这符合于实在——从已完成的实验没有理由可设想这一点——这样一种解释，正如雅诺西本人所指出的，仍然有若干惊人的后果(例如，会有比光速传播得更快的波，原因和结果的时间次序颠倒过来，等等)。因此，我们很难为了这种观点而甘愿牺牲量子论的简明性，除非实验迫使我们不得不这样做。

在有时被称为量子论的“正统”解释的其余反对者中，薛定谔采取了一种特殊立场，他把“客观实在性”归属于波而不归属于粒子，并且不准备把波仅仅解释为“几率波”。在他的题为《有量子跳

变吗？》一文中，他还试图完全否定量子跳变的存在(人们可能会怀疑"量子跳变"一词在这儿是否适用，并且或许能用比较不刺激人的"不连续性"一词来代替它)。现在，薛定谔的工作首先包含了对通常解释的某种误解。他忽略了这样一个事实，就是只有位形空间中的波(或者说"变换矩阵")是通常解释中的几率波，而三维物质波或辐射波却不是几率波。后者具有和粒子一模一样、不多不少的"实在性"；它们与几率波没有直接的联系，但却有连续的能量和动量密度，就象麦克斯韦理论中的电磁场一样。薛定谔因此正确地强调指出，在这一点上，可以设想这些过程是比它们通常的情况更为连续。但这种解释不能消除原子物理学中到处可以发现的不连续因素；任何闪烁屏或盖革计数器都会立刻显示出这种因素。在通常的量子论解释中，它包含在从可能到现实的转变中。薛定谔本人对于他究竟打算怎样以不同于通常解释的方式引入这种到处可以观察到的不连续因素，没有作出任何反建议。

最后，发表于几篇论文中的爱因斯坦、劳埃和其他人的批评，集中于哥本哈根解释是否允许对物理事实作出唯一的、客观的描述的问题。他们的主要论据可以叙述如下：量子论的数学方案好象是对原子现象的统计法的一种完全适当的描述。但即使这种解释关于原子事件的几率的陈述是完全正确的，它也没有描述那些独立于观测之外的、或者在两次观测之间实际发生的事情。但必定发生了某种事情，对此我们不能有所怀疑；这种事情不一定需要用电子或波或光量子等术语来描述，但必须以某种方式描述它，否则物理学的任务就没有完成。不能承认物理学只和观测的动作有关。物理学家在他的科学中必须假设，他正在研究的是一个不是由他自己创造的世界，要是他不在，这个世界还是存在着，本质上也没有改变。因此，哥本哈根解释对原子现象没有提供出真实的理解。

很易看出，这种批评所要求的还是老的唯物主义本体论。但是，从哥本哈根解释的观点看来，能够作出什么样的答复呢？

我们可以说，物理学是科学的一部分，并且以描述和理解自然为目的。无论哪一种理解，无论是科学的还是非科学的理解，都依赖于我们的语言，依赖于思想的交流。对于现象、实验及其结果的任何描述，都靠语言作为唯一的传达信息的工具。这种语言的词代表了日常生活的概念，在物理学的科学语言中，可把它们提炼为经典物理学的概念。这些概念是无歧义地报道事件、实验部署及其结果的唯一工具。因此，如果要求原子物理学家对他的实验中真实地发生的事情作出描述，那么，"描述"、"真实地"和"发生"等词只能和日常生活或经典物理学的概念有关。一旦物理学家放弃了这个基地，他就会丧失无歧义的传达信息的方法，并且不能继续他的科学工作。因此，关于"实际发生"的事情的任何陈述都是使用经典概念来表达的陈述，并且，由于热力学和测不准关系，在涉及原子事件的细节方面，这样的陈述在本质上是不完备的。要求对两次相继观测之间的量子论过程中"所发生的事情"进行"描述"，那是自相矛盾的，因为"描述"一词涉及经典概念的使用，而这些概念不能应用在两次观测之间的间隙，而只能应用于观测的那个时刻。

应当注意，在这一点上，量子论的哥本哈根解释决不是实证论的。因为实证论所根据的是观察者的感官知觉，以此作为实在的要素，而哥本哈根解释却把可以用经典概念描述的(即实际的)事物和过程看作是任何物理解释的基础。

同时，我们看到，微观物理学定律的统计本质是不能避免的，因为关于"实际事物"的任何知识——根据量子论的定律——在其真正的本质上都是不完备的知识。

唯物主义的本体论所根据的是这样一种幻想，即以为我们周

围世界的直接的"现实"这种存在，也能够外推到原子领域中去。然而，这种外推是不可能的。

关于上述反对量子论的哥本哈根解释的所有反建议的形式结构，还可以再评论几句。所有这些建议都已发现它们自己不得不牺牲量子论的必不可少的对称性（例如，波和粒子之间的对称性，位置和速度之间的对称性）。因此，如果这些对称性——就象相对论中的洛伦兹不变性一样——仍要被认为是自然的真正特征，那么，我们完全可以设想，哥本哈根解释是无法回避的。每一个已作出的实验都支持这种观点。

第 九 章

量子论和物质结构

物质这个概念在人类思想史上已经经历了许多变化。在不同的哲学体系中曾给予不同的解释。“物质”这个词的所有不同意义，至今仍然或多或少地存在于我们对这个词的理解中。

从泰勒斯到原子论者的早期希腊哲学，在对宇宙万物变化的统一本原的寻求中，已经形成了宇宙物质的概念，这是一种世界实体，它经历着所有这些变化，万物都由它形成，而万物又转变成它。这种物质部分地和某种具体物质，如水或空气或火相等同；说只是部分地相等同，因为它除了是构成万物的质料之外，再没有别的属性了。

后来，在亚里士多德的哲学中，物质被设想为处在形式与物质的关系之中。我们在我们周围的现象的世界中所知觉到的一切是成形的物质。物质本身并不是实在，而只是一种可能性，一种“潜能”；它只是靠形式而存在。在自然过程中，亚里士多德所谓的“本质”，从仅仅是可能性开始，通过形式，而转化为现实。亚里士多德的物质当然不是象水和空气一样的具体物质，也不仅仅是空虚的空间；它是体现通过形式转变为现实的可能性的一种不确定的、有形体的基质。亚里士多德哲学中物质与形式的这种关系的典型例子，是物质形成为生命机体的生物学过程和人类的建筑和造型活动。雕像在被雕刻家刻出以前，是潜在于大理石之中的。

然后，在很久以后，从笛卡儿的哲学开始，第一次把物质看作是精神的对立面。世界有两个互补的方面，“物质”和“精神”，或者

如笛卡儿所说的，“广延实体”和“思维实体”。因为自然科学的新的方法论原理，特别是力学的方法论原理，排斥了将有形体的现象追踪到精神力的一切企图，物质只能看作是与精神和任何超自然力无关的实在本身。这个时期的“物质”是“成形的物质”，成形的过程被解释成为力学相互作用的因果链条；这就丧失了它和亚里士多德哲学中有生长力的灵魂之间的联系，从而，物质与形式之间的二重性不再是适合的了。正是这种物质概念，在我们现今使用“物质”一词时，构成了最最牢固的成分。

最后，在十九世纪的自然科学中，另一个二重性起了某种作用，这就是物质和力之间的二重性。物质是能够承受力的东西；或者说，物质能够产生力。譬如，物质产生引力，而这种力又作用在物质上。物质和力是有形体世界两个显然不同的方面。就力可能是造形力来说，这个区别更接近于亚里士多德的物质与形式的区别。另一方面，在现代物理学的最近发展中，物质与力之间的这种区别完全丧失了，因为每个力场包含了能量，因而也就构成了物质。对于每一种力场，都有一种特殊的基本粒子隶属于它，这种基本粒子在本质上和物质的一切其他原子单位具有相同的性质。

当自然科学研究物质的问题时，它只有通过对物质的形式的研究才能进行。物质形式的无穷多样性和易变性必定是研究的直接对象，而努力必定是朝向寻求若干自然律、某些能作为通过这个广大领域的向导的统一原理。因此，长时期以来，自然科学——特别是物理学——的兴趣就集中在关于物质结构的分析和关于促使形成这些结构的力的分析。

自从伽利略的时代以来，自然科学的基本方法就一直是实验。这种方法使它能从一般经验推移到特殊的经验，从自然中挑选出有特征性的事件，从这些事件中能够比从一般经验中更直接地研究自然“定律”。如果人们要研究物质结构，人们必须拿物质做实

验。人们必须让物质处于极端条件下，以便研究它在那种条件下的嬗变，期望发现在一切明显的变化中都保持着的物质的基本特征。

在现代自然科学的早期，这是化学的对象，而这方面的努力颇早就导致化学元素的概念。一种物质，不能由化学家处置的任何方法——沸腾、燃烧、溶解、和其他物质混合等等——进一步离解或分化的，称为一种元素。引入这个概念是走向了解物质结构的第一步，也是最重要的一步。至少，物质的巨大多样性归结为比较少量的更基本的物质——“元素”了，从而在化学的各种现象中能够建立某种秩序了。“原子”一词用来表示属于一个化学元素的物质的最小单位，而化合物的最小颗粒能用一小团不同的原子来描绘。例如，铁元素的最小颗粒是铁原子，而水的最小颗粒是水分子，由一个氧原子和两个氢原子组成。

第二步并且是同样重要的步骤是化学过程中质量守恒的发现。例如，当碳元素烧成二氧化碳时，二氧化碳的质量等于化合过程发生前碳和氧的质量之和。正是这个发现给予物质概念以定量的意义；物质能用它的质量来度量，而与它的化学性质无关。

在后一个时期，主要是十九世纪，发现了许多新的化学元素；在今天，这个数量已到达一百个①。这种发展十分清楚地表明，化学元素的概念尚未到达人们能够理解物质统一性的地步。要人相信世界上有许多种类的物质，它们在性质上互不相同，并且相互之间没有任何联系，这是不能令人满意的。

在十九世纪的开始，从不同元素的原子量常常似乎是一个最小单位（接近氢的原子量）的整数倍这样一个事实中，发现了不同元素间的联系的某种迹象。某些元素的化学行为的类似性是引向同一个目标的另一个暗示。但只有通过比化学过程中的作用力强得多的力的发现，才能真正建立起不同元素间的联系，从而引导到

① 近年来，已经确认的化学元素已达 107 种，今后还可能增加。——译者注

物质的更严密的统一。

这些力在1896年贝克勒耳发现的放射性过程中确实发现了。由居里、卢瑟福和其他人继续进行的研究，揭示了放射过程中元素的嬗变。在这些过程中发射出α粒子，它们是原子的碎片，带有差不多比化学过程中单个原子粒子的能量大一百万倍以上的能量。因此，这些粒子可以用作研究原子内部结构的新工具。卢瑟福从α射线散射实验的结果得出了1911年有核的原子模型。这个著名的模型的最重要特征是原子分成两个截然不同的部分：原子核和周围的电子层。在原子中心的原子核只占有原子所占空间的非常小的一部分(它的半径小于原子半径的十万分之一)，但却几乎包含了原子的全部质量。它的正电荷是所谓基元电荷的整数倍，它决定了周围电子的数目——整个原子在电的性质上是中性的——和它们的轨道形状。

原子核和电子层之间的这种区分，立即给下面的事实作出了适当的解释，这事实就是：对于化学来说，化学元素是物质的最终单位，要使化学元素相互转化，就需要强得多的力。相邻原子间的化学键是由于电子壳层的相互作用，而这种相互作用的能量是比较小的。在一个放电管中，用只有几伏特的电势加速了的一个电子，就有足够的能量将电子壳层激发到发射辐射，或破坏分子中的化学键。但是，原子的化学行为虽然是由原子的电子壳层的行为所构成的，但却取决于原子核的电荷。如果人们要改变原子的化学性质，就必须改变原子核，而这需要差不多一百万倍以上的能量。

然而，如果把有核的原子模型设想为一种服从牛顿力学的系统，那就不能解释原子的稳定性。如前一章所指出，只有通过玻尔的工作，将量子论应用到这个模型上，才能解释如下的事实：例如，一个碳原子在与其他原子作用以后，或者在发出辐射以后，最后总仍然保持为一个带有以前一样的电子壳层的碳原子。这种稳

定性只能由量子论的这样一些特征来解释，这些特征不容许以空间和时间对原子结构进行简单的客观描述。

这样，人们终于有了理解物质的第一个基础。原子的化学性质和其他性质，可以通过把量子论的数学方案应用到电子壳层上而加以说明。从这个基础出发，人们可以尝试从两个相反方向扩展物质结构的分析。人们或者可以研究原子间的相互作用、它们与分子或晶体或生物学对象等更大单位的关系；或者可以尝试通过原子核与其组成部分的研究，深入到物质的最终单位中去。过去十年中，研究工作在这两条路线上都有了进展，下面我们将讨论量子论在这两个领域中的作用。

两个邻近原子间的力首先是异性相吸和同性相斥的电力；电子受到原子核的吸引，电子与电子又相互排斥。但这些力不按照牛顿力学定律起作用，而是按照量子力学定律起作用。

这导致原子之间两种不同类型的结合。在一种类型中，一个原子的电子跑到另一个原子中，例如，去填满一个几乎闭合的电子壳层。在这种情况下，两个原子最后都带电，而形成物理学家所谓的离子，并且因为它们的电荷是相反的，他们互相吸引。

在另一种类型中，一个电子以量子论所特有的方式同时属于两个原子。利用电子轨道的图象，人们可以说电子围绕着两个原子核旋转，并在每一个原子中都逗留相当的时间。这第二种结合类型相当于化学家所称的共价键。

这两类力可以以任何混合的形式发生，而促使各种原子团的形成，并且似乎是物理学和化学中研究的大量物质的一切复杂结构的最终原因。化合物的形成是通过包含不同原子的小的闭合原子团的形成而发生的，每个原子团是化合物的一个分子。晶体的形成是由于原子排列成规则的点阵。当原子是如此紧密地排列着，以致它们的外层电子能够离开它们的壳层而在整个晶体中移

动时，就形成了金属。磁性是由于电子的自旋运动引起的，如此等等。

在所有这些例子中，物质与力之间的二重性仍能保持，因为人们可以认为原子核与电子是由电磁力联结在一起的物质的碎片。

这样，物理学与化学在它们与物质结构的关系方面差不多完全联合起来了，而生物学则处理更为复杂的并多少有所不同的类型的结构。确实，虽然生命机体是一个整体，生命物质与非生命物质的严格界线仍然是无法作出的。生物学的发展为我们提供了大量例子，在这些例子中人们可以看到，特殊的大分子或大分子团或链具有特殊的生物学功能，并且在现代生物学中有着一种日益增长的把生物学过程解释为物理学与化学定律的结果的趋势。但是生命机体显示的稳定性的类型在本质上多少与原子或晶体的稳定性有所不同。这与其说是形式的稳定性，不如说是过程或功能的稳定性。无疑的，量子论定律在生物学现象中起着很重要的作用。例如，只能用化学价的概念不准确地描述的那些特殊的量子理论性的力，对于了解大的有机分子和它们的各种各样的几何形式是不可缺少的；辐射引起生物学突变的实验，既显示了统计量子理论定律的关联，又显示了放大机构的存在。我们的神经系统的工作与现代电子计算机的功能之间的极其类似，又一次说明了在生命机体中单个基元过程的重要性。然而所有这些并不足以证明物理学、化学以及进化概念有朝一日将提供生命机体的完全描述。实验科学家在探讨生物学过程时，必须比探讨物理学和化学更要小心翼翼。正如玻尔所指出，很可能，从物理学家的观点看来可以称为完全的那种对生命机体的描述是不能作出的，因为这需要一些十分强烈地干预生物学功能的实验。玻尔曾经描述了这种状况，他说，在生物学中，同我们发生关系的，与其说是我们自己所能完成的各种实验的结果，不如说是我们所属的自然界中各种可能

性的表示。这种表述所暗示的互补状况在现代生物学研究方法中被描述为一种倾向，这种倾向一方面充分利用了全部的物理学和化学的方法与结果，另一方面，是奠基于有机界的不包含于物理学和化学中的那些特征的概念，例如生命的概念等等。

到这里，我们追踪了一个方向的物质结构分析；从原子到包括许多原子的更复杂的结构；从原子物理学到固体物理，到化学和生物学。现在我们必须转向相反的方向，并且追随从原子外部到内部和从原子核到基本粒子的研究路线。正是这条路线可能导致对物质统一性的理解。这里我们不需要害怕我们的实验会破坏了特征性的结构。当提出的任务是试验物质的最终统一性时，我们可以将物质置于尽可能强的力之前，置于最极端的条件下，以便看一看是否任何物质最终能够嬗变为任何其他物质。

这个方向的第一步是对原子核的实验分析。在差不多充满于本世纪的头三十年内的这些研究的初始时期中，唯一对原子核运用的实验工具是放射性物质所发出的α粒子。卢瑟福在1919年利用这些粒子成功地促成了轻元素原子核的嬗变；例如，他能使一个氮原子核嬗变为氧原子核，方法是在氮原子核中加一个α粒子同时打出一个质子，这是使人联想起化学变化过程的原子核范围的变化过程的第一个例子，它导致元素的人为嬗变。第二个实质性的进展是，如所周知，用高压装置把质子人工加速到足以促使原子核嬗变的能量。为此目的，差不多需要一百万伏特，而考克饶夫(Cockcroft)和瓦尔顿(Walton)在他们的第一次决定性实验中就成功地使锂原子核嬗变成为氦核。这个发现开辟了一条全新的研究路线，它在适当的意义上可以称为原子核物理学，并且它立刻导致对原子核结构的定性理解。

原子核结构确实是很简单的。原子核只由两类基本粒子组成。一类是质子，它同时也就是氢原子核；另一类是所谓中子，它

是质量与质子差不多的电中性粒子。每一个原子核可以由组成它的质子和中子的数目来表征。例如，正常的碳原子核由6个质子和6个中子组成。还有其他的碳原子核，比较不大常见(称为前者的同位素)，由6个质子和7个中子组成，等等。所以，人们最后得到一种对物质的描述，在这种描述中，代替许多不同的化学元素，只出现三个基本单元：质子、中子和电子，所有由原子构成的物质都是由这三类基本建筑基石组成。这还不是物质的统一，但确实是朝向统一化和——或许更重要的——简单化的重大步骤。当然，从关于原子核的两种建筑基石的知识过渡到完全了解它的结构还有很长的路程。这里问题与二十世纪中叶已经解决的外层原子壳的相应问题多少有所不同。电子壳层中粒子间的作用力已很准确地知道了，但是必须寻找动力学定律，这在量子力学中找到了。在原子核中的动力学定律可以设想为就是量子力学中的那些定律，但是粒子间的力并不是预先就知道的；它们必须从原子核的实验性质中推导出来。这个问题尚未完全解决。力或许不是如电子壳层中静电力那样简单形式的力①，因此，由于根据复杂的力来计算原子核的性质的数学困难和实验的不准确性使得进展十分困难。但是，原子核结构的定性理解肯定已经得到了。

这样，就剩下最后一个问题，即物质统一性的问题。是不是基本建筑基石——质子、中子和电子——就是物质的最终的不可毁灭的单位，就是德谟克利特意义上的原子(除了作用于它们之上的力之外，它们之间没有任何关系)？或者它们正是同类物质的不同形式？它们是否还能相互嬗变，是否还能嬗变成其他的物质形式？在着手解决这个问题的实验中，所需要集中于原子粒子的力和能量远大于研究原子核时所需要的力和能量。因为原子核中所蕴藏的能量还不够大，不足以作为我们进行这类实验的工具，物理学家

① 现在已知道原子核中有强相互作用力和弱相互作用力。——译者注

如不依靠宇宙规模的力，就得依靠工程师的天才和技巧了。

实际上，在这两条路线上都有了进展。在第一种情况下，物理学家使用了所谓宇宙辐射。广延在巨大空间中的星体表面的电磁场在一定的环境下能够加速带电的原子粒子、电子和原子核。由于原子核的惯性较大，它们似乎有较多的机会在加速电场中多停留一长段距离，并且最后当它们离开星体表面进入空虚的空间时，它们已穿过了几十亿伏的电势。在星体间的磁场中它们可能进一步被加速；总之，原子核似乎有很长一段时间被不断变化的磁场保留在星系空间中，而最后它们在这个空间中装满了人们称为宇宙辐射的那种东西。这种辐射从外面到达地球，它实际上由各种原子核所组成，例如由氢原子核和氦原子核和其他较重元素的核所组成，它们大约具有一亿或十亿电子伏的能量，在比较稀有的情况下，还可到达这个数量的一百万倍。当这种宇宙辐射的粒子穿入地球大气时，它们击中大气中的氮原子和氧原子，或者可以击中受到辐射的任何实验装置中的原子。

另一条研究路线是建造大的加速器，它的典型就是劳仑斯(Lawrence)在三十年代初期在美国加利福尼亚州建立的所谓回旋加速器。这些加速器的基本思想是用强磁场把带电粒子保持在圆圈上运动许多次，使它们能够在旋转过程中一次又一次地为电场所加速。能量达到几亿电子伏的机器已在英国使用。通过十二个欧洲国家的合作，一个这种类型的非常巨大的机器目前正在日内瓦建造，我们期望它的能量能达到250亿电子伏①。由宇宙辐射或大加速器所完成的实验已经显示了物质的新的有意义的特征。除了物质的三种基本的建筑基石——电子、质子和中子——之外，已发现了一些新的基本粒子，它们能够在这些极高能过程中产

① 现在世界上最大的质子加速器能量是4,000—5,000亿电子伏。人们还在计划建造更高能量的新型加速器。——译者注

生出来，并且在很短的时间之后消失。这些新的粒子，除了它们的不稳定性之外，具有与老粒子相似的性质。即使最稳定的这种粒子，它们的寿命也只有大约百万分之一秒，而其他粒子的寿命甚至比这还要小一千倍。现在，大约已知道25个不同的新基本粒子；最新的一个是反质子[1]。

乍看起来，这些结果似乎离开了物质统一性的概念，因为物质基本单位的数目又增加到可以和不同化学元素的数目相比较的数值。但这不是一个适当的解释。实验同时表明，粒子能够从其他粒子产生出来，或仅仅由这些粒子的动能产生出来，而它们又能蜕变为其他的粒子。实验已经实际证明了物质的完全互换性。在能量足够大时，所有的基本粒子都能嬗变为其他粒子，它们能够仅仅从动能产生，并能湮灭而转化为能量，譬如说转化为辐射。因此，这里我们实际上有了对物质统一性的最终证明。所有基本粒子都由同一种实体制成，我们可以称这种实体为能量或普遍物质(universal matter)；所有的基本粒子正是这种物质所能呈现的不同形式。

如果我们将这种状况与亚里士多德关于物质和形式的概念相比较，我们可以说，亚里士多德的物质既然仅仅是"潜能"，就应当可以和我们的能量概念相比较，当基本粒子产生时，它通过形式转化为"现实"。

现代物理学当然不能满足于物质基本结构的仅仅是定性的描述；它必须尝试根据仔细的实验研究，为决定着物质"形式"、基本粒子和它们的力的那些自然律建立一个数学形式系统。在这部分物理学中不能再在物质和力之间划一条清楚的界线，因为每一种基本粒子不仅产生某些力并受力的作用，它同时还代表某种力场。量子理论的波粒二象性使得同一种实体既以物质的形式出现，又

① 目前已经发现的基本粒子已有三百多种。——译者注

以力的形式出现。

建立关于基本粒子的定律的数学描述的一切尝试早从波场的量子论就已开始了。关于这种类型理论的理论工作早在三十年代已经开始。但在这条路线上的最早的研究就发现了严重的困难，其根源是在量子论与狭义相对论结合之处。乍看起来似乎是这样：量子论和相对论这两个理论所涉及的自然的方面是如此不同，所以它们实际上应当互不相关，从而在同一个形式系统中容易满足两个理论的要求。然而更深入的了解表明：两个理论在一点上还是互相干扰的，而全部困难正是从这一点上产生的。

狭义相对论已经显示了一种时间空间结构，它和自牛顿力学以来普遍假设的时间空间结构有所不同，这个新发现的时间空间结构的最突出的特征是存在着一个极限速度，这就是任何运动体或任何传递信号均不能超越的光速。因此，如果在相距很远的两点上的两个事件发生于这样的时间，使得在一个点上发生事件的瞬间发出的光信号只是在另一点发生了另一事件之后才能到达该点，那么，这两个事件之间就不能有任何直接的因果联系；反之亦然。在这种情况下，两个事件可以称为是同时的。因为没有任何一种作用能从一点到达另一点，所以，没有任何东西从一点上发生的事件及时地传给另一点发生的另一事件而把两个事件联系起来，两个事件之间没有任何因果联系。

由于这个理由，任何类型的超距作用，例如牛顿力学中的万有引力，同狭义相对论都是不相容的。这个理论必须用从一点到另一点，即从一点到无限邻近的点的作用来代替超距作用。这类作用的最自然的数学表示是关于波或场的微分方程，这些微分方程相对于洛伦兹变换是不变的。这样的微分方程排斥“同时”事件间的任何直接作用。

由此可见，狭义相对论所表示的时间空间结构隐隐地包含着

这样一个意思，即在同时性的区域和其他区域之间存在着无限明确的界限：在同时性区域内，不能传递任何作用，而在其他区域内，从一个事件到另一个事件的直接作用是能够发生的。

另一方面，量子论的测不准关系对于能够同时测量的位置与动量、或者时间和能量的准确度施加了明确的限制。因为一个无限明确的界限意味着关于空间时间中的位置的无限准确性，所以动量或能量必须是完全不确定的，或者说在事实上，任意高的动量和能量必须以占压倒优势的几率出现。由此可见，任何企图同时满足狭义相对论和量子论的要求的理论将导致数学上的自相矛盾，导致极高能量与动量区域的发散。上述结论的这个后果或许不象是有严格约束力的，因为所考察的任何一个这种类型的形式系统都是很复杂的，并且或许可能提供避免量子论与相对论间的冲突的某些数学可能性。但是，迄今为止，所有曾经尝试过的数学方案在事实上要不是导致发散（即导致数学的矛盾），就是不能满足两个理论的全部要求。很容易看出，这种困难实际上正是来自上面讨论过的那一点。

有一种方法，虽然它所用的收敛的数学方案不满足相对论或量子论的要求，然而这种方法本身却十分有意思。例如，有过一个方案，当用时间空间中的实际事件来解释它时，会导致某种时间倒流；这种方案会预言出这样一种过程，在这种过程中，粒子会突然地在空间某点产生，而它的能量却在后来才由在另外的某个点的基本粒子间的某个碰撞过程所提供。物理学家根据他们的实验，深信这类过程不在自然中产生，至少这两个过程如果在空间时间中分隔着一个可测间隔是不可能的。另一个数学方案试图通过所谓重正化的数学方法来避免发散，它似乎能将形式系统中的无穷大逼近到一个位置，那里它们不会妨碍那些能被直接观测的物理量间的确定关系的建立。实际上这个方案已经使量子电动力学得

到非常实质性的进展，因为它说明了氢光谱中以前所不了解的某些有意义的细节。然而，对这种数学方案的更深入的分析表明，它可能会出现这样的情形，就是在重正化的形式系统中，那些在正常的量子论中必须解释为几率的物理量在一定的条件下能够变成负的。这将使人们无法前后一致地使用这种形式系统来描述物质。

这些困难的最终的解决办法尚未发现。有朝一日，它将从关于各种不同的基本粒子、它们的产生与湮灭、它们之间的力的日益准确的实验资料的积累中浮现出来。在寻求这种困难的可能解决方案时，人们或许应当想起：带有前面讨论过的时间倒流的这种过程，可能是不应从实验上排除的，如果它们只在我们现在的实验装置所能及的范围之外的极端小的时间空间区域内发生的话。当然，人们或许将勉强地接受这种带有时间倒流的过程，如果在以后物理学的任何阶段有可能象人们追踪普通的原子事件一样地从实验上追踪这种事件。但是，在这里对量子论和相对论的分析，可能会又一次帮助我们从新的角度看看这个问题。

相对论与自然中的一个普适常数光速相联系，这个常数决定了时间与空间的关系，因而隐含于必须满足洛伦兹不变式的任何自然律之中。我们的自然语言和经典物理学概念只能适用于在实际上可把光速看作无限大的那些现象。

当我们在实验中接近光速的时候，我们就必须准备对付不能用这些概念解释的结果。

量子论是和自然界的另一个普适常数——普朗克作用量子——相联系的。只有当我们在一个可把普朗克常数当作无限小的较大标尺上处理对象和过程时，关于时间和空间中事件的客观描述才是可能的。当我们的实验接近作用量子成为不可忽略的区域时，我们就接触到本书前几章讨论过的有关日常概念的所有那些

困难。

自然中必定还存在第三个普适常数。从纯量纲的推理看来，这是很明显的。普适常数决定着自然的标度，决定着那些不能归结为其他物理量的特征量。对于一个完全的单位集，至少需要三个基本单位。这从物理学家使用的 c-g-s 制（厘米-克-秒制）这样的惯例中很容易看出来。一个长度单位、一个时间单位和一个质量单位就足以构成一个完全的单位集；但至少也必须有三个单位。人们还可以用长度、速度和质量的单位代替它们；或者用长度、速度、能量的单位代替它们，等等。但是，至少三个基本单位是必要的。现在，光速和普朗克作用常数只提供了这些单位中的两个。必定有第三个普适常数，并且只有包含这第三个单位的理论才能确定基本粒子的质量和其他性质。从我们现有的关于基本粒子的知识加以判断，引入这第三个普适常数的最适宜方法或许是假设一个普遍长度，其值应当差不多为 10^{-13} 厘米，即比轻原子核的半径稍小一些。当人们用这样三个单位构成了一个表示式，使它的量纲相当于质量时，它的值就正好具有基本粒子质量的数量级。

如果我们假设自然律确实包含具有长度量纲、数量级为 10^{-13} 厘米的第三个普适常数，那么，我们还可以预料，我们的日常概念只适用于比这个普适常数大的时空区域。当我们的实验接近于小于原子核的半径的时间空间区域时，我们又应当准备应付在性质上具有新的特征的现象。前面说过的时间倒流现象，迄今为止还只是从理论考察中得出的一种数学可能性，它可能就属于这些最小的区域。如果事情就是这样，那么，或许就不能以可用经典概念描述的方式观测到它。这样的过程，在它们能被观测和能用经典术语描述的范围内，或许服从通常的时间顺序。

但所有这些问题将是原子物理学未来研究的课题。人们可以希望高能区域的实验和数学分析的联合努力有一天终将导致对物

质统一性的完全理解。"完全理解"这几个字意味着，亚里士多德哲学意义上的物质形式或许会作为表示物质的自然律的一个闭合数学方案的解，作为它的结果而出现。

第　十　章

现代物理学中的语言和实在

贯穿整个科学史，新的发现和新的思想总是引起科学上的争论，引出一些批评新思想的论战性论著，而这样的批评却常常有助于它们的发展；但是这种论战在过去从未到达象相对论发现时所达到的那种激烈程度，而量子论的发现所引起的争论的激烈程度又较差一些。在这两个例子中，科学问题最终都与政治争端发生联系，而且有些科学家就曾依靠政治的方法来贯彻推行他们的观点。只有当人们认识到现代物理学的最新发展已使物理学的基础发生动摇，并且认识到这种动摇已经引起科学即将丧失基地的预感，人们才能理解对现代物理学的新近发展的这种激烈的反应。同时，这或许还意味着，人们尚未找到谈论新形势的正确语言，而到处狂热地发表的关于新发现的不正确的陈述已经引起了各种各样的误解。这确实是一个根本性问题。现代的先进实验技术已在科学领域中引入了不能用普通概念描述的自然的新面貌。但是，应该用什么样的语言来描述它们呢？在科学阐明过程中涌现出来的第一种语言，在理论物理学中常常是数学语言，就是允许人们去预言实验结果的数学方案。当物理学家有了数学方案，并且知道如何用它来解释实验时，他就可以满意了。但是他还必须向非物理学家谈论他的结果，对于他们，如果不用任何人都能理解的平常语言作出某种解释，他们是不会满意的。即使对于物理学家，平常语言的描述也是衡量他所达到的理解程度的一个标准。这样一种描述究竟可能达到什么样的程度呢？人们能够谈论原子本身吗？

这是一个物理学问题，同时也是一个语言学问题，因此，关于一般语言，特别是科学语言，作若干评论是必要的。

语言作为人们传达信息的方法和思考的基础，早在史前时期就在人类的氏族中形成了。我们对语言形成的各个步骤知道得很少；但是现在的语言包含了许多概念，它们是关于日常生活事件的比较明确的传达信息的适当工具。这些概念是在使用语言的过程中未作严格的分析而逐渐获得的，在经常反复使用一个词之后，我们认为我们多少知道它意味着什么。当然，这是一个众所周知的事实：词都不是那么清楚地定义了的，虽然乍看起来它们似乎是那样，它们只有一个有限的适用范围。例如，我们可以说一块铁或一块木头，但我们不能说一块水。"块"这个词不适用于液状物质。或者，再举另一个例子：在关于概念的局限性的讨论中，玻尔喜欢讲下面这个故事："一个小孩跑进食品店，手中拿了一个便士，问道：'我能买一便士的杂拌糖吗？'食品商拿了两块糖，把它们递给小孩，说：'这里是你的两块糖。你可以自己把它们杂拌起来。'"有时甚至色盲也能使用"红"与"绿"这两个词，虽然对于他们，这些词的适用范围必定十分不同于其他人，这个事实是词与概念之间的成问题的关系的一个更为严重的例子。

词的意义的内在的不确定性当然很早就被认识到了，并且这已引起了对定义的需要，或者如"定义"一词所说的，需要确定哪里可以用这个词和哪里不能用这个词的界限。但定义只能用其他概念作出，因而人们最终必将依靠某些概念，并且，这些概念是按照它们本来的面目那样拿来使用的，既未经过分析，也未作过定义。

在希腊哲学中，语言中的概念问题自苏格拉底(Socrates)以来，就是一个主要的题目，苏格拉底的一生——如果我们能够引用柏拉图在他的对话中的艺术性描写的话——是连续不断地讨论语言中概念的内容和表达形式的局限性的一生。为了获得科学思考

的坚实基础，亚里士多德在他的逻辑中着重分析了语言形式，分析了与它们的内容无关的判断和推理的形式结构。这样，他所达到的抽象和准确的程度，是希腊哲学在他之前所未曾知道的，因此，他对我们思想方法的阐明和建立思想方法的秩序作出了巨大贡献。他实际上创造了科学语言的基础。

另一方面，语言的这种逻辑分析又包含了过分简化的危险。在逻辑中，注意力只集中于一些很特殊的结构、前提和推理间的无歧义的联系、推理的简单形式，而所有其他语言结构都被忽略了。这些其他的结构可以起因于词的某种意义之间的联系；例如，一个词的次要意义，只是在人们听到它时模糊地通过人们的心灵，但它却可以对一个句子的内容作出主要的贡献。每个词可以在我们内心引起许多只是半有意识的运动，这个事实能够用到语言中来表示实在的某些部分，并且甚至比用逻辑形式表达得更清楚。因此，诗人常常反对在语言和思考中强调逻辑形式，它——如果我正确地解释了他们的意见的话——可能使语言不太适合于它的目的。例如，我们可以回忆一下哥德(Goethe)的《浮士德》(*Faust*)中靡非斯特(Mephistopheles)对青年学生所说的那段话：

时间要好生利用，它是驷马难追，
秩序却能够教你不至把它荒废。
所以我要劝你，诚实的朋友，
你应该先把逻辑研究。
你的精神便可以就范，
象统进西班牙的长靴一般，
你会慎重地循着思维的轨道，
不致于胡乱地东奔西跑。
譬如平常的饮食，
本来是一口可以吃完，

但到你研究过逻辑，
那就要分出第一！第二！第三！
而且这座思维的工场，
其实和织布的工头一样，
一踩每涌出千头万绪，
梭子只见来往飞飏，
眼不见的一条经线流去，
一打则万线连成一张。
哲学家要走来教你：
第一段如是，第二段如是，
则第三第四段如是，
假如第一第二不如是，
则第三第四永不如是。
随处的学生都在赞奖，
但没有一人成为织匠。
想认识生物，记述生物的人，
首先便要驱逐精神，
结果是得到些零碎的片体，
可惜没有精神的连系。①

这一节引文包含了对于语言结构和单纯逻辑形式的狭隘性的令人赞叹的描述。

另一方面，科学必须依靠语言作为唯一的传达信息的方法，并且在传达中，在无歧义性问题具有最大的重要性的地方，逻辑形式必须起它们的作用。在这点上，特征性的困难可以描述如下。在自然科学中，我们试图从一般导出特殊，试图理解由简单的普遍规

① 译文引自哥德：《浮士德》，郭沫若译，第一卷，新文艺出版社，1954年版，第88页。——译者注

律引起的特殊现象。用语言表述的普遍规律只能包含少量简单的概念——否则规律将不是简单和普遍的了。从这些概念要推导出无限多样性的可能现象,不仅是定性地,而且要在每一个细节上都以完全的准确性推导出来。显然,日常语言的概念,既然它们是不准确的并且是模糊地定义的,就决不能允许作这样的推导。当从既定的前提导出判断的链条时,链条中可能有的环的数目依赖于前提的准确性。由此可见,自然科学中普遍规律的概念必须以完全的准确性规定下来,而这只有用数学的抽象方法才能做到。

在其他也需要比较准确的定义的科学中,例如在法学中,情况多少有点相象。但这里判断的链条中环的数目不需要很大,因而不需要完全的准确性,用日常语言作出的比较准确的定义就足够了。

在理论物理学中,我们试图引入一些能够与事实(即测量结果)相关联的数学符号来理解各类现象。关于这些符号,我们使用了能令人联想到它们与测量的相互关系的名称。这样,符号就同语言联系起来了。然后,这些符号通过严格的定义和公理的系统彼此联系起来,最后,再用符号间的方程式来表示自然规律。于是,这些方程的解的无限多样性将对应于这部分自然中可能出现的特殊现象的无限多样性。这样,在符号与测量间有着关联的情况下,数学方案就代表了这类现象。正是这种关联容许用普通语言来表达自然规律,因为由作用与观测组成的实验总是能用日常语言来描述的。

还有,在科学知识的增长过程中,语言也增长了;引入了新的术语、把老的术语应用到更广阔的领域,或者以不同于日常语言中的用法来使用它们。"能量"、"电"、"熵"这样一些术语是明显的例子。这样,我们发展了一种科学语言,它可以称为与科学知识新增加的领域相适应的日常语言的自然扩展。

在上世纪，在物理学中引入了许多新概念，在某些情况下，科学家们要真正习惯于使用那些概念，需要相当长的时间。例如，“电磁场”一词在法拉第的著作中已在某种程度上出现了，后来它构成了麦克斯韦的理论的基础，但它却不容易为那些主要注意物质的机械运动的物理学家所接受。这个概念的引入实际上也牵涉到科学观念的变化，而这样的变化不是很容易完成的。

还有，直到上世纪末所引入的全部概念构成了适用于广阔经验领域的完全首尾一贯的概念集，并且，与以往的概念一起，构成了不仅是科学家、也是技术人员和工程师在他们的工作中可以成功地应用的语言。属于这种语言的基本观念是这样一些假设：事件在时间中的次序与它们在空间中的次序完全无关；欧几里得几何在真实空间中是正确的；在空间和时间中“发生”的事件与它们是否被观测完全无关。不可否认，每次观测对被观测的现象都有某种影响，但是一般假设，通过小心谨慎地做实验，可使这种影响任意地缩小。这实际上似乎是被当作全部自然科学的基础的客观性理想的必要条件。

在物理学的这种颇为平静的状态中，突然闯进了量子论和狭义相对论，自然科学的基础移动了，开始是缓慢的，后来渐渐加快。第一次激烈的讨论是围绕着相对论提出的空间和时间问题展开的。人们应当怎样谈论新的状况呢？人们应当把运动体的洛伦兹收缩看作是真实的收缩，还是把它仅仅看作是一种表观的收缩呢？人们应当说时间空间结构是真正不同于过去所假设的那样呢，还是人们只应当说实验结果能在数学上以这种方式对应于这种新的结构，而作为我们面前事物存在的普遍和必要形式的时间空间仍保持它们过去一贯具有的样子？这许多争论后面的真实问题是这样一个事实，就是人们没有可用来前后一致地谈论新状况的语言。日常的语言是以旧的时间空间概念为基础的，这种语言过去提供

了关于测量的部署和测量的结果的唯一无歧义的传达信息的方法。但是实验已经表明，旧的概念不能到处适用。

因此，相对论的解释的明显出发点是这样一个事实：在小速度(与光速相比较)的极限情形下新理论实际上与旧理论相等同。因此，在理论的这部分中，数学符号显然必须与测量和日常语言的术语相关联；事实上，正是通过这种关联，才发现了洛伦兹变换。在这个区域里，关于词和符号的意义没有任何含糊之处。事实上，这种关联已足以把这个理论应用到整个有关相对论问题的实验研究领域。由此可见，关于洛伦兹收缩的"实在性"和"表观性"的争论问题，或者关于"同时性"一词的定义的争论问题等等，与其说是有关事实的问题，不如说是语言问题。

另一方面，关于语言，人们已渐渐认识到，人们或许不应当太坚持确定的原则。在语言中应当选择什么样的术语，以及它们应当如何应用，总是难以找到普遍令人信服的准则。人们应当只是等待语言的发展，等它在若干时候以后，自己调整到与新的状况相适应。实际上，在狭义相对论中，这种调整在以往五十年中已经在很大程度上发生了。例如，"实在的"和"表观的"收缩之间的区别，已经简单地消失了。"同时的"一词已经按照爱因斯坦的定义来使用了，而前面一章讨论过的更广泛的定义"类空距离"这一术语已普遍地应用了，等等。

广义相对论中关于真实空间中非欧几里得几何学的观念受到某些哲学家的强烈反对，他们指出，我们整个部署实验的方法，都是以欧几里得几何学为前提的。

实际上，如果一个工匠企图准备一个完全的平面，他能用如下的方法做成。他首先准备三个差不多同样大小的表面，它们差不多已是平面。然后他尝试把三个表面中的任何两个在各种相对位置面对面地相互接触。在整个表面上，这种接触能够密切到怎样

的程度，是可叫做“平面”的表面的准确度的量度。只要三个表面中任何两个都能到处完全接触，工匠将对他的三个表面表示满意。如果这一点成立了，人们能够从数学上证明欧几里得几何学在三个表面上均成立。这样，就证明了欧几里得几何学正是由我们自己的量度使它成为正确的。

从广义相对论的观点看来，当然，人们能够回答说，这种论证只证明欧几里得几何学在小的空间范围内成立，在我们实验装置的大小范围内成立。在这个范围里，它具有如此高的准确度，以致上述制造平面的过程总能够实现。但由于表面不是由严格刚性的材料构成的，它容许很小的变形，又因为“接触”这一概念不能完全准确地定义，所以将不能觉察仍存在于这个范围中的对于欧几里得几何学的极微小的偏离。关于宇宙尺度的表面，上述操作过程就不适用了；但这不是一个实验物理学问题。

并且，广义相对论中数学方案的物理解释的明显出发点是这样一个事实，就是几何学在小范围内非常接近于欧几里得几何学；而相对论在这个范围内接近于经典理论。由此可见，在这里，数学符号和测量与日常语言中的概念之间的关联是无歧义的。但是，人们可以在大空间范围里谈论非欧几何学。事实上，甚至在广义相对论建立前很久，数学家，特别是哥丁根的高斯，似乎已经考虑了非欧几何学在真实空间中的可能性。当高斯完成了非常准确的、由三个山头——哈尔茨山脉的布罗肯山、图林根的英舍耳堡山和靠近哥丁根的霍恩哈根山头——构成的三角的大地测量之后，据说他曾经很仔细地检验过三个角之和是否真正等于 180°；这表明他曾把那种可以证明背离欧几里得几何学的差别看作是可能有的实在。实际上，在测量的准确度范围内，他没有发现任何背离。

在广义相对论中，我们现在用来描述普遍定律的语言实际上继承了数学家的科学语言，而对于实验本身的描述，我们能够使用

日常概念，因为欧几里得几何学在小空间范围里是足够准确地成立的。

然而，关于使用语言的最困难的问题是在量子论中发生的。这里我们第一次失去了使数学符号与日常语言概念相关联的简单的引导；一开始我们所知道的唯一东西是我们的普通概念不能应用于原子结构这一事实。还有，量子力学的数学形式系统的物理解释的明显出发点，似乎是量子力学的数学方案在比原子大得多的范围内接近于经典力学的数学方案这一事实。但是，即使是这个陈述，也必须作某些保留。即令在大范围内，量子理论方程仍有许多解在经典力学中找不到与它们相似的解。在这些解中，如在前几章中所讨论的，会出现"几率的干涉"现象，而这在经典物理学中是没有的。由此可见，即令在大范围的极限中，数学符号、测量和日常概念间的关联也决不是无关紧要的。为了找到这样一种无歧义的关联，人们必须考虑到问题的另一个特征。必须看到，用量子力学方法处理的系统事实上是一个大得多的系统（实际上是整个世界）的一部分；它和这个大得多的系统相互作用着；而人们必须补充说明，这大得多的系统的微观性质（至少在很大程度上）是未知的。这个陈述无疑是实际状况的正确描述。因为如果系统同包含观察者在内的大得多的系统没有相互作用的话，这个系统就不能成为测量和理论研究的对象，它在事实上就不属于现象的世界。这样，同带有没有明确规定的微观特性的大得多的系统的相互作用，在所考察的系统的描述中引入了一个新的统计因素——包括量子理论的和经典的。在大尺度的极限情形下，这个统计因素破坏"几率干涉"效应到如此程度，以致此时量子力学方案实际上在这个极限情况下接近于经典力学方案。因此，在这一点上，量子论的数学符号与日常语言概念的关联是无歧义的，而这种关联已足以解释实验。其余问题与其说是关于事实的，也无宁说是关于

语言的，因为它属于能用日常语言描述的“事实”这个概念。

但是，语言问题在这里确实是严重的。我们希望以某种方式谈论原子结构，而不仅仅是谈“事实”——后者只是照相底片上的黑斑或云室中的水滴等等。但是，我们却不能用日常语言谈论原子。

现在能够进一步从两个完全不同的方面来分析。或者我们问：从建立量子力学形式系统的三十年来，关于原子，物理学家们实际上建立了什么样的语言。或者我们可以叙述一下关于确定一种对应于这个数学方案的准确科学语言的尝试。

在回答第一个问题时，人们可以说，玻尔引入量子论解释中的互补概念鼓励了物理学家们宁可使用一种含糊的语言，而不使用一种无歧义的语言，以符合于测不准原理的比较模糊的样子来使用经典概念，交替地使用那些在同时使用时会导致矛盾的经典概念。以这种方式，人们谈论电子轨道、物质波和电荷密度、能量和动量等等，总是意识到这些概念只有很有限的适用范围。当这样模糊和不系统地使用语言导致困难时，物理学家必须回到数学方案及它与实验事实的无歧义的关联中。

语言的这种使用方法在许多方面是十分令人满意的，因为它使我们想起在日常生活或诗歌中的类似的用法。我们认识到互补性不仅仅限于原子世界；当我们反省一个决定和我们作决定的动机时，或者当我们在欣赏音乐和分析它的结构之间有所选择时，我们就遇到它。另一方面，当以这种方式使用经典概念时，它们总是保持某种含糊性，它们在它们与“实在”的关系中所得到的只是如经典热力学概念在它的统计解释中那样的统计意义。因此，简要地讨论一下热力学的这些统计概念可能是有用的。

“温度”概念在经典热力学中似乎是描述实在的一个客观特征，是描述物质的一种客观属性的。在日常生活中，用一个温度计

十分容易确定我们陈述一种物质有某种温度的含义。但当我们试图规定一个原子的温度的意义时，我们就处在一个颇为困难的境地，即令在经典物理学中也是如此。实际上我们不能将“原子的温度”这个概念和原子的明确规定了的属性相联系，但是我们至少必须将它部分地和我们对它的不完全的知识相联系。我们可以将温度值和关于原子属性的某种统计预期值相关联，但一个预期值是否应当称为客观的，这似乎是颇令人怀疑的。“原子的温度”这个概念并不比买杂拌糖的小孩的故事中的“杂拌”概念定义得更好一些。

同样，在量子论中，所有的经典概念当用到原子身上时，也就象“原子的温度”一样地定义得不清楚，它们也和统计预期值相关联；只有稀少的例子中，预期值才可能与确知值相等同。还有，和在经典热力学中一样，很难称这种预期值是客观的。人们或许可以称它为客观的倾向或者可能性，称它为亚里士多德哲学意义上的“潜能”。确实，我相信当物理学家谈论原子事件时，他们实际使用的语言在他们内心引起与“潜能”的概念相类似的想法。所以，与其说物理学家渐渐习惯于把电子轨道等等看作是实在，不如说习惯于把它们看作是一种“潜能”。至少在某种程度上，语言已经调整了自己，使之与这种真实的情况相适应。但这不是人们可以使用普通逻辑形式的那种准确语言；而是在我们内心引起图象的那种语言，但在引起图象的同时，还引起这样一种想法，就是图象和实在只有模糊的联系，它们只代表一种朝向实在的倾向。

在物理学家中使用的这种语言的模糊性，已因此引起规定另一种准确语言的尝试，这种准确语言遵循完全符合于量子论数学方案的确定的逻辑形式。可以把柏克霍夫（Birkhoff）和诺埃曼（Neumann）以及最近威札克尔所作的这些尝试的结果作这样的陈述，就是说：能够把量子论的数学方案解释为经典逻辑的推广与

修正。特别是经典逻辑中的一个基本原理似乎需要修正。经典逻辑假设：如果一个陈述有任何意义的话，那么，或者这个陈述是正确的，或者这个陈述的否定是正确的，二者必居其一。在“这里有一张桌子”或者“这里没有桌子”两句话中，不是第一句，就是第二句必定是正确的。“Tertium non datur”，没有第三种可能性。我们可能并不知道是陈述本身还是它的否定是正确的，但在“现实”中，二者总有一个是正确的。

在量子论中，“没有第三种可能性”这个法则必须加以修正。为反对这个原理的任何修正，人们当然立刻能够争辩说，这个原理是用普通语言假设的，而我们至少必须用自然语言谈论我们对逻辑的可能修正。这样，用自然语言来描述一个并不适用于自然语言的逻辑方案就是一种自相矛盾。然而，在这里，威札克尔指出，人们可以区别语言的各个层次。

第一个层次涉及对象——譬如涉及原子或电子。第二个层次涉及有关对象的陈述。第三个层次可以涉及关于对象的陈述的陈述，如此等等。那么，在不同的层次可能有不同的逻辑形式。确实，最终我们必须回到自然语言，从而回到经典逻辑形式。但是，威札克尔提出，经典逻辑可能类似于量子逻辑的前身，就象经典物理学是量子论的前身一样。那么，经典逻辑就可能被包含于量子逻辑之中，作为它的一种极限情形，而后者将构成更为普遍的逻辑形式。

这么一来，经典逻辑形式的可能修正，首先将涉及有关对象的那一层次。让我们考察在一个密闭箱中运动的一个原子。用一箱壁把这个箱子分为两个相等的部分，壁上有一个很小的孔，使原子能从中通过。那么，按照经典逻辑，原子如不在箱子的左半边，就必定在右半边。没有第三种可能性：“tertium non datur”。然而，在量子论中，如果我们仍用“原子”和“箱子”等词的话，我们就必须

承认，还有其他的可能性，这种可能性是前面两种可能性的奇特的混合物。这对解释我们的实验结果是必需的。例如，我们能观察被原子散射的光。我们能够做三个实验：在第一个实验中，原子限制在箱子的左半边（例如，关闭壁上的孔），然后测量散射光的强度分布；第二个实验把原子限制在右半边，再测量散射光的强度分布；在最后一个实验中原子可以在整个箱子中自由运动，再测量散射光的强度分布。如果原子总是不在左半边就在右半边，最后一个实验中的强度分布将是前两种强度分布的混合（按照原子在两个半边度过的时间的比例）。但这在实验上一般不成立。如前所述，真实的强度分布为“几率干涉”所修正了。

为了应付这种情况，威札克尔引入了“真实度”的概念。在二者择一的任何简单陈述中，例如“原子是在箱子的左半边（或右半边）”，规定一个复数作为它的“真实度”的量度。如果数值是1，这意味着陈述为真；如果数值为零，这意味着陈述为假。但是其他的值也是可能的。复数的平方的绝对值给出陈述为真的几率；但是有关二者择一（这里是非“左”即“右”）的两个部分的两个几率之和必定为1。但是，有关二者择一的两部分的每一对复数，按照威札克尔的定义，代表一个肯定为真的“陈述”，如果这些复数恰恰取这些数值的话；例如，两个数值足以决定我们实验中散射光的强度分布。如果人们容许这样使用“陈述”一词，人们就能用下列定义引入“互补性”一词：每个不与二者择一的陈述中的任何一个陈述相同的陈述——在我们这个例子中，就是不与“原子在箱子的左半边”或“原子在箱子的右半边”的两个陈述相同的陈述——称为互补于这两个陈述的陈述。对于每一个互补的陈述，原子究竟是在左边或右边的问题是不决定的。但是“不决定”一词决不等于“不知道”一词。“不知道”将意味着原子“实在是”在左边或右边，只是我们不知道它在哪里而已。但是“不决定”是指另一种情况，即只能用

互补的陈述表示的情况。

这种普遍的逻辑形式(其细节不能在这里描述)，准确地对应于量子论的数学形式系统。它构成那种用来描述原子结构的准确语言的基础。但是使用这样一种语言，引起了许多困难问题，我们将在这里讨论其中的两个问题：语言的各个不同"层次"间的关系，和基本的本体论的后果。

在经典逻辑中，语言的不同层次间的关系是一一对应的。"原子是在左半边"和"原子在左半边是真实的"这两个陈述，在逻辑上属于不同层次。在经典逻辑中，这两个陈述是完全等价的，就是说，它们或者都为真，或者都为假，不可能一个为真，另一个却为假。但在互补性的逻辑形式中，这种关系却更为复杂。第一个陈述的正确性或不正确性仍然包含了第二个陈述的正确性或不正确性。但是第二个陈述的不正确性并不包含第一个陈述的不正确性。如果第二个陈述是不正确的，那可能是不能确定原子是否在左边：原子不需要一定在右边。在陈述的正确性方面，语言的两个层次仍然是完全等价的，但在陈述的不正确性方面就不是如此了。从这个联系中，人们能够了解到量子论中经典定律继续存在的特性：只要在一个给定的实验中，能用经典定律推导出肯定的结果，也就能从量子论推导出这个结果，并且这个结果在实验上成立。

威札克尔的尝试的最终目的，是将修正了的逻辑形式也应用到语言的更多层次中，但这些问题不能在这里讨论了。

另一个问题涉及作为修正了的逻辑形式的基础的本体论。如果一对复数以刚才所描述的意义代表一个陈述，那么，在自然中应当存在一个"态"或者一个"状态"，在其中这个陈述是正确的。以后我们将在这种联系上使用"态"这个词。接着，威札克尔称对应于互补陈述的"态"为"共存态"。"共存"这个词正确地描述了这种状态；确实很难称它们为"不同态"，因为每种态在某种程度上还包含

了那个“共存态”。于是，这种“态”的概念可能构成关于量子论的本体论的第一个定义。人们可以立刻看出，“态”这个词的这种用法，特别是“共存态”这个词的用法，同通常的唯物主义本体论是如此不同，以致人们可能会怀疑，是否人们正使用着一种便利的术语。另一方面，如果人们不把“态”这个词看作是对实在的描述，而宁可看作是对某种潜能的描述——人们甚至可以就拿“潜能”这个词来代替“态”这个词——那么，“共存潜能”的概念是完全讲得通的，因为一种潜能可以包含其他潜能，或者与其他潜能相重叠。

如果人们把语言限制于事实的描写，即实验结果的描写，所有这些困难的定义和区分就能够避免。然而，如果人们希望谈论原子粒子本身，人们就必须或者是使用数学方案作为自然语言的唯一补充，或者是将它与使用修正了的逻辑的语言相结合，或者甚至和使用没有明确规定的逻辑的语言相结合。在有关原子事件的实验中，我们必须同物与事实打交道，同象日常生活中任何现象一样真实的现象打交道。但是，原子或基本粒子本身却不象是真实的；与其说它们构成一个物与事实的世界，不如说它们构成一个潜能或可能性的世界。

第十一章

现代物理学在当前人类思想发展中的作用

为了指明科学的这个最现代化的部门——现代物理学——在许多点上接触到人类思想的很老的倾向，为了指明它从一个新的方向接触到某些很古老的问题，前面几章讨论了现代物理学的哲学意义。在人类思想史上，最有成果的发展常常发生在两条不同的思想路线的交叉点上，这一般讲来或许是真实的。这些思想路线可能发源于人类文化的完全不同的部分、不同的时间或不同的文化环境或不同的宗教传统，因此，如果它们在实际上相遇了，即如果它们至少已互相关联到能够发生真实的相互作用的程度，那么，人们可以期望新的和有意义的发展也将随之而来。作为现代科学的一个部门的原子物理学，在我们这个时代，确实已渗透到迥然不同的文化传统中去了。不仅在自然科学传统的活动地区欧洲和西方国家中在讲授原子物理学；而且在远东，在日本、中国和印度这样具有完全不同的文化背景的国家中，也在研究它；在当代已建立了一种新的思想方法的俄国也在研究它；俄国的新思想方法既与十九世纪欧洲特殊的科学发展有关，也和出自俄国本身的其他完全不同的传统有关。当然，下面的讨论的目的肯定不可能是对现代物理学的观念和老传统遭遇后的可能结果作出预测。但要指出不同观念间可能发生冲突的某些点还是可能的。

在考察现代物理学的这个扩展过程时，当然不能将它与自然科学、工业和工程技术、医学等等的一般扩展分割开来，更普遍地

说，即不可能和世界各地的现代文化的发展分割开来。现代物理学正是从培根(Bacon)、伽利略和开普勒(Kepler)的工作和从十七、十八世纪自然科学的实际应用开始的无数事件组成的长链中的一个环节。自然科学与技术科学的联系从一开始就是互相支援的：技术科学的进展、工具的改进、以及新技术装置的发明，提供了日益准确的自然经验知识的基础；而对自然的理解的进展和自然律的数学形式系统的最终建立，又开辟了在技术科学中应用这些新知识的道路。例如，望远镜的发明使天文学家能比以往更准确地测量星体的运动，从而使天文学和力学有可能作出可观的进展。另一方面，力学定律的准确知识，对于机械工具的改进和引擎的设计等等具有最大的价值。自然科学与技术科学的这种结合的巨大扩展，是在人们把某些自然力成功地置于人类的控制之下的时候开始的。例如，蕴藏在煤中的能量能够完成过去由人来做的某些工作。从这些新可能性产生的工业部门在开始时可看作是较老行业的自然继承和扩展；机器的工作在许多点上仍类似于老的手工艺，而化工厂的工作可看作是古代染坊和制药业工作的继承。但是后来，全新的工业部门发展起来了，这些部门在古老的行业中没有相当的行业；譬如电机工程就是这样。科学对自然的更为微小的部分的深入探索使得工程师能够利用过去几乎不知道的自然力；而用支配这些力的定律的数学形式系统表示的有关这些力的准确知识构成了设计各种机械的坚实基础。

自然科学与技术科学的这种结合的巨大成果使得这种人类活动盛行的那些民族、国家或社会处于卓越的优势，并且作为这种情况的一个自然的结果，就连那些在传统上不倾向于自然科学和技术科学的国家也不得不从事这些活动。通讯和交通的现代化方法最终完成了技术的这种扩展过程。无可怀疑，这个过程已经根本改变了我们地球上的生活条件；并且不管人们是否赞许它，不管人

们称它是进步或是危险，人们都必须认识到，它已远远超出人类力量所能控制的范围。人们可以更恰当地把它看作是一个最大规模的生物学过程，在这个过程中，人类社会中能动的组织侵入了更大部分的物质，并把它转变为适合于人口增长的状态。

现代物理学属于这种发展的最新部分，并且它的不幸的、最触目的结果——核武器的发明——已再清楚不过地显示了这种发展的真髓。一方面，它已最清楚地指出，不能只以乐观的观点来看待自然科学与技术科学的结合所带来的变化；它至少已经部分地证实了那些抱反对态度的人的观点，他们曾一再警告我们生活的自然条件的这种根本性变化会带来危险。另一方面，它甚至已迫使那些企图远离这些危险的国家和个人也对新的发展给予最强烈的注意，因为以军事力量为基础的政治力量显然要依靠原子武器的占有。充分讨论原子核物理学的政治意义当然不是本书的任务。但是关于这些问题，至少也应当说几句话，因为当谈到原子物理学时，它们总是最先引起人们的注意。

显然，新武器的发明，特别是热核武器的发明，已经根本改变了世界的政治结构。不仅独立民族和国家的概念发生了决定性的变化，因为不拥有这些武器的任何国家必定在某种程度上依赖于少数大量生产这种武器的国家；而且使用这种武器的大规模战争的尝试实际上已成为一种荒唐的自杀。因此，人们常常听到乐观的论调，说战争已因此而变为过时的了，它将不再发生。不幸，这种观点是将问题过分乐观地简化了。相反的，使用热核武器的荒唐性，在第一级近似的意义上，可能起着鼓励常规战争的作用。任何相信自己有历史上和道义上的权利去强行改变现状的国家和政治集团，将感到为这个目的而使用常规武器不致冒任何巨大的风险；他们会假设对方当然不会求助于核武器，因为对方在这次争端中在历史上和道义上是有错的，不致于发动大规模战争。这种状

况将依次地引起其他国家发表声明，当侵略者把小型战争强加于它们时，它们实际上可以求助于核武器，因而显然仍存在危险。十分可能，在今后二、三十年内世界将经历如此巨大的变化，以致大规模战争的危险、应用各种技术手段来消灭敌人的危险将大大减少或消失。但是通往那种新形势的道路将充满最大的危险。我们必须如以往任何时期一样，认识到从一方看来在历史上和道义上是正确的，从对方看来则可能是错的。继续维持现状不可能总是正确的解决办法。相反，去寻找一些适应新形势的和平方法可能是最重要的，并且在许多情况下，要最终找到任何正确的决定是极端困难的。由此可见，鉴于是非问题从对方看来可能根本不同，只有当所有不同的政治集团准备放弃某些它们似乎最明显的权利，才可能不太悲观地说世界大战是可以避免的。这当然不是一种新的观点；事实上，这只是许多世纪以来某些大宗教所倡导的人类风度的应用而已。

核武器的发明也对科学与科学家提出了一些全新的问题。科学的政治影响比第二次世界大战以前强烈得多了，而这一事实赋予科学家特别是原子科学家以双重的责任。或者，他能够由于科学对社会的重要性的关系而积极参加国家行政管理；那么，他实际上不得不担当起作出有巨大份量的决策的责任，这将远远跨越他过去所习惯的研究工作与大学工作的小圈圈。或者，他可以自愿地拒绝参与任何政治上的决策；那么，他仍要对错误的决策负责，因为如果他甘愿放弃科学家的平静生活，他或许能够阻止这种错误的决策。向政府报告热核战争可能带来的空前毁灭的详细情况，显然是科学家的责任。除此之外，科学家常常被请求去参加维护和平的庄严决议；但是，谈到这后一要求，我必须承认我从未能看完这类宣言的任何要点。这类决议可能是好心的很好的证明；但是任何人，如果他口头上讲维护和平，却不想准确地讲这种和平

的条件，他必定会立即被人怀疑为只是高唱对他和他的集团最为有利的那种和平——这当然是毫无价值的。任何诚实的和平宣言必须是对人们准备为维护和平而作出的牺牲的估算。但是通常科学家无权作这类声明。

同时，科学家能在他自己的领域中尽全力促进国际合作。许多国家对今天原子核物理研究的重视和不同国家的科学工作水平仍然十分悬殊的事实，有利于这种工作的国际合作。许多不同国家的年轻科学家可以聚集在从事着现代物理学领域中的紧张活动的研究所中，而对于困难的科学问题的协同研究将促进相互的了解。在日内瓦欧洲核子研究中心这一个例子中，在许多不同国家之间甚至能达成协议，建立一个公共的研究所，并共同努力建造昂贵的原子核物理研究用的实验设备。这种合作当然有助于在年轻一代的科学家中建立对于科学问题的一个共同态度——甚至对纯科学问题之外的问题也抱共同态度。当然，人们无法预料，这样播下的种子在这些科学家回到他们的老环境中并且重新参与他们自己的老文化传统时，将结出什么样的果子。但人们很少怀疑，不同国家的年轻科学家之间和每个国家不同代的科学家之间的思想交流，将有助于使许多问题不太紧张地接近新的状态，即较老的传统力量和现代生活的必然需要之间达到了平衡的状态。这特别是科学的一个特征，由于这种特征，没有任何东西比科学更适合于建立不同文化传统间的头等巩固的联系。事实是，关于专门科学研究工作的价值的最终判定，关于研究工作中什么是正确、什么是错误的问题，并不依赖于任何个人的权威。同时，在人们知道一个问题的答案之前，在人们能够区分真理与谬误之前，需要花费许多年时间；但最后问题将被判定，而判定不是由任何科学家的集团作出，而是由自然本身作出。由此可见，科学思想在科学爱好者中传播的方式与政治思想的传播方式是完全不同的。

一些政治思想可以得到大量人民群众的信服，正是因为它们符合于、或者好像符合于人民的主要利益，而科学思想的传播却只是因为它们是真理。它们是保证科学陈述的正确性的客观的和最终的标准。

这里关于国际合作和思想交流所谈到的一切，对于现代科学的任何部门当然都是同样真实的；它决不应当仅限于原子物理学。在这方面，原子物理学只是许多科学部门中的一个，而且即令它的技术应用——武器和原子能的和平利用——给这个部门以特殊的份量，也没有理由认为在这个领域中的国际合作比在任何其他领域要重要得多。但我们现在还必须讨论一下本质上不同于以往自然科学的发展的现代物理学的那些特征，为了这个目的，我们必须再一次回顾欧洲的这种发展的历史，而这种发展是由于自然科学和技术科学的结合而实现的。

在历史学家中曾经常常讨论这样一个问题，是否在十六世纪以后自然科学的兴起就是人类思想的早期倾向的自然结果。可以这样说，基督教哲学的某种倾向会导致非常抽象的上帝的概念，他们把上帝抬到如此高高在上、超越世界的地位，以致人们开始考察世界的时候用不到同时在世界上还看到上帝。笛卡儿分类可以说是这种发展的最后一步。或者，人们可以指出，所有十六世纪的神学争论引起了对这类问题的普遍不满，这类问题并不能真正合理地解决，而是纠缠在当时的政治斗争之中；这种不满有利于对同神学争论完全无关的那些问题发生兴趣。或者人们可以只谈到通过文艺复兴进入欧洲社会的新精神的巨大活动。总之，在这个时期，出现了一个新的权威，它与基督教或者基督教哲学无关，也与教会无关，这是经验的权威，经验事实的权威。人们能从这种权威追溯到老的哲学倾向，例如追溯到奥卡姆（Occam）和邓斯·司各脱(Duns Scotus)的哲学，但只有到十六世纪以后，它才成为人类活

动的生气勃勃的力量。伽利略不仅想到机械运动、单摆和落石;他还定性地试验了这些运动是如何发生的。这种新的活动在开始时当然并不意味着对传统的基督教的背离。相反，人们谈到了上帝的两类启示。一类写在圣经中，另一类将在自然的书中被发现。圣经是过去的人类写出的,因而容易有错误,而自然是上帝意志的直接表示。

然而,注重经验是和实在面貌的缓慢和逐渐的变化相联系的。在中世纪，我们今天称为一个物的象征意义的东西在某种程度上是它的原始实在,现在,实在的面貌改变为我们能够用我们的感官感知的东西。我们能够看到的和接触到的东西成为原始地真实的东西。而实在的这种新概念能够同新的活动相联系:我们能够实验并看看物真正是怎样的东西。很容易看出，这种新态度意味着人类精神开始进入了新可能性的广大领域,并且很容易理解,教会在新运动中与其说是看到了希望，不如说是看到了危险。对伽利略的与他对哥白尼系统(Copernican system)的观点有关的著名审判,标志了进行一个世纪以上的斗争的开始。在这次争论中,自然科学的代表人物主张经验提供不可辩驳的真理，不能委托任何人类权威来判定自然中真正发生了什么事情，这个判定是由自然作出的,或者在这个意义上是由上帝作出的。另一方面,传统宗教的代表人物则主张由于对物质世界的过分注意，对我们用感官感知的东西过分注意,我们丧失了同人类生活的主要意义的联系,丧失了同在物质世界之外的那部分实在的联系。这两类主张不能共存,因此任何协议和决议都不能解决问题。

同时，自然科学开始作出了物质世界的一种更清晰和广阔的图景。在物理学中，这种图景是用我们今天称之为经典物理学概念的那些概念来描绘的。世界由空间和时间中的物体组成，物体由物质组成，物质能产生力并受到力的作用。事件由于物质和力

之间的相互作用而发生；每个事件都是其他事件的结果和原因。同时，人类对自然的态度从瞑想的转变为实用的。人们不再太关心自然是怎么样的；而更愿意问人们能够利用自然做些什么。因此，自然科学转向了技术科学；知识的每一步进展都和从它能引导出什么实际应用的问题相联系。这不仅在物理学中是真实的；在化学和生物学中，情况也基本相同，而医学或农业中新方法的成功对这种新倾向的传播作出了主要的贡献。

这样，直到十九世纪发展了自然科学的一个极端僵硬的框架，它不仅构成了科学，而且还构成了广大人民群众的普遍见解。这个框架得到时间、空间、物质和因果性等经典物理学的基本概念的支持；得到适用于我们用感官所感知的或用技术科学所提供的精密工具所观察到的事物的实在概念的支持。物质是初始的实在。科学的进展被描绘为征服物质世界的十字军。实用成了时代的口号。

另一方面，这个框架是过于狭窄和僵硬了，以致于在其中难以找到一个地方来安排我们语言的许多概念——那些永远属于它的真正实质的概念，例如精神的概念、人类灵魂或生命的概念。精神只能作为物质世界的一面镜子被纳入总的图景；并且当人们在心理科学中研究这面镜子时，科学家常常倾向于——如果我可以作进一步类比的话——更注意它的机械性质，而不太注意它的光学性质。甚至有人还试图在那里应用经典物理学的概念，首先是因果性的概念。同样，生命被解释为由自然律支配的、完全由因果律决定的物理学和化学过程。达尔文的进化概念为这种解释提供了充分证明。在这个框架中，特别难以找到曾经是传统宗教的对象而现在看来似乎只是一种假象的那部分实在的位置。因此，在那些欧洲国家中，由于人们惯于追随这种观点直到最终的结果，科学对宗教的一种公开的敌意发展起来了，甚至在其他国家中，对于这

些问题的分歧也有日益增长的趋势；只有基督教的伦理标准与这种趋势无关，至少在目前是如此。对科学方法和理性思维的信仰代替了人类精神的一切其他保护物。

现在回过来谈谈现代物理学的贡献，人们可以说，由它的成果带来的最重要变化是十九世纪概念的这种僵硬框架的解体。当然，以前也曾作了多次尝试去摆脱这个僵硬的框架，这个框架对于理解实在的主要部分，显然是太狭窄了。但是过去未能发现，像物质、时间、空间和因果性等在科学史上曾经是如此极端成功的基本概念中，有什么可能是错了。只有用技术科学所能提供的全部精密仪器所作出的实验研究本身及其数学解释，才提供了批判分析（或者可以说，是被迫批判分析）这些概念的基础，并最后地导致了僵硬框架的解体。

这种解体是明确地分两个阶段发生的。第一阶段是通过相对论，发现了甚至像时间和空间这样的基本概念也能够改变，并且事实上根据新的经验也必须改变。这种改变并不涉及自然语言中时间空间的多少有点模糊的概念；但确实涉及到牛顿力学的科学语言中它们的准确的形式系统，尽管牛顿力学过去曾被错误地当作是最终的力学。第二阶段是关于原子结构的实验结果迫使人们进行的关于物质概念的讨论。物质的实在的观念或许是十九世纪中概念的僵硬结构中最坚固的部分，而且这个观念至少已结合着新的经验加以修正。这些概念在属于自然语言的范围内，仍然未受到触动。当人们必须描述原子实验和它们的结果时，可以毫无困难地谈论物质，或谈论事实，或谈论实在。但是要将这些概念科学地外推到物质的最小部分，那就不是用经典物理学所建议的那种简单方式所能办到的，虽然它已错误地决定了关于物质问题的一般见解。

首先必须把这些新结果看作是对多少有点勉强地把科学概念

应用于它们并不隶属的那些领域的严重警告。例如，把经典物理学的概念应用于化学中，已经是一个错误。因此，人们现在不大会倾向于假设物理学的概念(甚至量子论的那些概念)能够肯定地应用于生物学或其他科学的任何方面。尽管如此，我们还是想尝试让新概念进入那些科学部门，即使在这些部门中旧概念对理解现象曾经是十分有用的。特别是，在应用旧概念似乎有点勉强或显得不十分适合于问题的那些方面，我们将尝试避免作任何轻率的结论。

不仅如此，现代物理学的分析和发展的最重要特征之一是这样一个经验，就是：自然语言的概念既然是模糊地定义的，似乎在知识的扩展中，比起科学语言的准确术语更为稳定，因为这些科学语言只是从有限的一组现象中推导出来的一种理想化情形。事实上这不值得奇怪，因为自然语言概念是从与实在的直接联系中形成的；它们代表实在。确实，它们没有很好地定义，因此可以随着世纪的消逝而发生变化，就像实在本身那样，但它们决不丧失与实在的直接联系。另一方面，科学概念是理想化情形；它们是从用精密的实验工具所获得的经验推导出来，并通过公理和定义准确地定义下来的。只有通过这些准确定义，它才能将概念和数学方案联系起来，并从数学上推导出这个领域内可能现象的无限多样性。但通过这种理想化和准确定义的过程，与实在的直接联系丧失了。在曾作为研究对象的自然的那一部分中，概念仍然很密切地符合于实在。但在包含另一些类别的现象的自然的其他部分中，这种符合就可能丧失了。

在记住自然语言概念在科学发展过程中的内在稳定性的同时，人们看到——根据现代物理学的经验——我们对精神、人类灵魂、生命或上帝意志等概念的态度将不同于十九世纪，因为这些概念属于自然语言，因此与实在有直接联系。确实，我们还将认识

到，这些概念都不是在科学意义上很好地定义了的，并且它们的应用可能导致各种矛盾，暂时我们还必须使用这些概念，虽然对它们未作分析；但是我们仍然知道它们接触了实在。在这方面，回想一下甚至在科学的最准确部门——数学——中，我们也不能避免使用包含矛盾的概念，可能是有用的。例如，大家都知道，无限的概念导致前面分析过的那些矛盾，但是如果没有这个概念，实际上就不可能创立数学的主要部门。

十九世纪的人类思想主要倾向于对科学方法和准确理性的术语的日益加强的信仰，并且这种倾向也促使人们对不适合于科学思想的闭合框架内的那些自然语言概念——譬如，宗教的那些概念——表示普遍的怀疑。现代物理学已在许多方面加强了这种怀疑；但同时它又转而反对过高估计准确的科学概念，反对这种怀疑本身。对准确的科学概念的怀疑并不意味着对理性思维的应用范围应有明确的限制。相反的，人们可以说，人类的理解能力在某种意义上可以是无限制的。但是，现有的科学概念总是只能涉及实在的有限部分，而其余尚未理解的部分却是无限的。当我们从已知向未知推进时，我们可以希望去理解，但是同时我们可能必须学习“理解”一词的新意义。我们知道，任何理解最终必须根据自然语言，因为只有在那里我们才能确实地接触到实在，因此，我们必须对有关这种自然语言及其主要概念的任何怀疑表示怀疑。由此可见，我们可以使用这些概念，就象在过去任何时候使用它们一样。这样，现代物理学或许已为对人类精神和实在的关系的更广阔的见地打开了大门。

在我们这个时代，这门现代科学正向在文化传统上完全不同于欧洲文化的世界其他部分渗入。在那些地区必定比欧洲更强烈地感觉到自然科学和技术科学的这种新活动的冲击，因为欧洲在两三个世纪内发生的生活条件的变化，在那里将在几十年内发生。

人们可以预料，在许多地方，这种新活动必定以旧文化衰退的状态出现，以推翻全部人类的幸福所依靠的敏感的平衡这样一种残忍和野蛮的姿态出现。这样的后果是不能避免的；必须把它们看作是我们时代的一种面貌。但即令在那里，现代物理学的开放也可能在某种程度上有助于调和老传统和新的思想倾向。举例说吧，第二次世界大战以来日本对理论物理学的巨大贡献，可能就是远东传统的哲学思想和量子论的哲学基础之间的某种结合的标志。如果人们没有接受过本世纪头十年尚流行于欧洲的朴素的唯物主义思想方法，或许会更容易接受量子理论的实在概念。

当然，这样的提示不应当误解为低估技术进展的冲击对老的文化传统所能给予或已经给予的破坏。但因为这整个发展长时期以来远远超出了人类力量的任何控制，我们必须接受它作为我们时代的最主要特征，并且必须尝试尽可能将它和人生的意义联系起来，这种人生的意义曾经是老的文化和宗教传统的目的。这里可以从哈什教(Hasidic religion)引述一个故事：从前有一个老的智者，一个以他的聪明闻名的长老，所有人都向他求教。有一个人去拜望他，那人对他周围所发生的一切变化都感到失望，向长老申诉所谓技术进步带来的全部灾难。他大声斥责道："如果人们考虑一下人生的真正意义，所有这些技术的骚扰不是毫无价值吗？""可能是这样，"智者回答说："但是，如果一个人有正确的态度，他就能在每一件事物中学习。""不，"来访者抗辩说："从铁路、电话或电报这样的蠢物中人们什么也不能学到。"但是智者回答说："你错了。你能够从铁路学到：如果你迟到一霎那，就会失去一切。你能从电报学到对每个字都加以计算。而从电话你能够学到，我们在这里说的话能在那里被听到。"来访者领会了智者的意思后就离开了。

最后，现代科学渗入了我们现代世界的大片地区，在那里，新

的学说只建立了几十年，而这些新学说是新的有力量的社会的基础。在那里，现代科学既面对着起源于十九世纪欧洲哲学思想（黑格尔和马克思）的那些学说的内容，又面对着固执坚持信仰的现象。因为现代物理学由于它的实用价值在这些国家必定起巨大的作用，所以，那些真正理解现代物理学及其哲学意义的人，很难不感觉到这些学说的狭隘性。因此，在这一点上，科学和一般思想倾向的相互作用就会发生。当然，不应当把科学的影响估计过高；但现代科学的开放或许甚至能够使大部分人民更容易发现学说对于社会并不如过去所假设的那么重要。这样，现代科学的影响可能支持容忍的态度，从而可以证明是有价值的。

另一方面，固执坚持信仰的现象比十九世纪的某些专门哲学观念带有更大的份量。我们不能闭着眼睛不看这样一个事实，这就是大多数人很难对某个重要的普遍思想与学说的正确性作出很有根据的判断。因此，"信仰"一词对于这大多数人并不意味着"感知某些事物的真理"，而只能理解为"以此作为生活的基础"。人们很容易理解，这第二种信仰比第一种信仰更为顽固，更坚定得多，因为它甚至能够面对直接矛盾的经验而固执己见，因而不能为新增加的科学知识所动摇。过去二十年的历史已以许多例子表明，这第二种信仰有时可以被捧到看来是完全荒唐的地步，并且这些信仰者至死也是执迷不悟的。科学和历史能够教导我们，对于抱这种信仰的那些人，这种信仰可能成为巨大的危险。但是这样的认识是没有用处的，因为人们不知道如何去避免它，因而这样的信仰总是属于人类历史的巨大力量。从十九世纪的科学传统出发，人们当然倾向于希望一切信仰都应当以对每一个论证的理性分析，以小心的审议为基础；而另一种信仰，即把某种真实的或表观的真理简单地当作生活的基础的信仰则不应当存在。确实，根据纯粹理性的论证作出的小心的审议能够使我们消除许多错误与危

险，因为它允许重新调整以适应新的形势，而这可能是生活的必要条件。但是想到我们在现代物理学中的经验，就很容易看出，在审议与决定之间总是必定有一个基本的互补关系。在实际的生活的决定中，不大可能把偏袒一个决定或反对一个决定的全部论证都加以考察，因此，人们总是不得不在不充足的证明的基础上行动。只有撇开全部论证——包括那些已经理解的论证和另一些只有通过进一步审议才能作出的论证——并摆脱一切犹豫不决，才能最终作出决定。决定可以是审议的结果，但它同时又互补于审议；并且，它是排斥审议的。甚至生活中最重要的决定，也总是一定包含这种不可避免的非理性因素。决定本身是必需的，因为必须有某种可以依靠的东西，必须有指导我们行动的某种原理。没有这样一种稳固的立足点，我们自己的行动就会丧失全部力量。因此，用某种真实的或者表观的真理构成生活的基础是不可避免的；而且在认识这个事实时，应当考虑到那些人的集团的基础和我们自己的基础是不同的。

现在，在从所谈到的现代科学的一切来作结论时，人们或许会说，现代物理学正是朝向统一并扩大我们的现代世界的一般历史过程的一个部分，而且是一个很有特征性的部分。这个过程本身将导致缓和造成我们时代的巨大危险的那些文化和政治的紧张形势。但它又为向相反方向行动的另一过程所伴随。广大人民群众意识到这种统一过程的事实，鼓励了现存文明社会中一切力量去力图在最终的统一状态中保证它们的传统的准则发挥最大可能的作用。从而紧张形势加强了，这两种竞争过程是如此密切地相互交织着，以致统一过程的每一次强化——例如由于新的技术进步——也强化了对最终状态的影响的斗争，从而给瞬变状态增加了不稳定性。现代物理学在这危险的统一过程中或许只起微小的作用。但它至少在两个决定点上将引导发展过程成为一种平静的演

化过程。首先，它表明在这过程中使用武器是灾难性的；第二，通过它对各类概念的开放，它提出了在最终的状态中许多不同文化传统可以共存的希望，提出了可以将不同的人类的努力结合到思想与事业之间、活动与沉思之间的一种新的平衡之中的希望。

附　录

英文本序言

诺斯劳普(F. S. C. Northrop)
耶鲁大学法学院斯特林讲座哲学和法学教授

如所周知，当代物理学已经引起人类的宇宙观及其同宇宙的关系的重要的修正。有人设想，这种修正突破了人类的命运和自由的基础，甚至影响到人类对他掌握自己的命运的能力的看法。这种设想，在物理学的各个部门中，再没有比量子力学的测不准原理表现得更直截了当了。本书的作者是测不准原理的发现者。事实上，这个原理通常都冠以他的名字。因此，要判断这个原理意味着什么，没有人比他更合适的了。

海森伯在他以前的一本书《量子论的物理原理》①中，向专业物理学家们阐明了量子力学的理论解释、实验意义和数学工具。在本书中，他向外行人阐明了量子力学和其他物理理论，以及这些理论的哲学含意和它们的某些可能的社会后果。比较明确地说，他试图在本书中提出并回答下列三个问题：(1)已被实验所证实了的当代物理学理论肯定了什么？(2)它们容许或者要求人们怎样去设想他自己同他的宇宙的关系？(3)这种作为现代西方的创造的新思想方法将要怎样影响世界的其他地区？

海森伯只是在本书的开头和结尾部分简要地探讨了第三个问题。读者不要因为他的评述的简短而忽视了它们的重要意义。正

① 《量子论的物理原理》(*The Physical Principles of the Quantum Theory*), University of Chicago Press, Chicago, 1930.

如他所指出，不管我们喜欢与否，现代思想方法将要改变并且部分地破坏传统习惯和社会准则。非西方社会的本国领袖和他们的西方顾问常常设想，将现代科学仪器和方法引入亚洲、中东和非洲的问题，仅仅是给予当地人民以政治独立然后向他们提供经费和实用的仪器的问题。这种轻易的设想忽略了几件事情。第一，现代科学仪器渊源于它的理论，为了正确地制造和有效地使用它们，需要理解那个理论。第二，而这个理论又以哲学假设和物理假设为依据。一旦被人们理解了，这些哲学假设就会产生一种个人的和社会的精神状态和行为，它们完全不同于并且在有些问题上不相容于亚洲、中东或非洲本地人的以家族、等级、种族为中心的精神状态和社会准则。总之，人们不能在引入现代物理学仪器的同时，而不或早或晚地引入它的哲学精神，而这种哲学精神，当它一旦掌握了受过科学训练的青年，就将推翻对家族和种族的陈腐的道德忠诚。如果要不致于因此引起不必要的感情冲突和社会的道德败坏，那么，让青年人理解到他们正在遭遇的事情，这是重要的。这意味着，他们必须把他们的经验看作是两种不同的哲学精神的结合，即他们的传统文化和新物理学的结合。由此可以看出人人都理解新物理学的哲学的重要性。

但是，可能有人要问：物理学是不是完全同哲学无关？现代物理学是不是只有在抛弃了哲学之后才能成为有成效的？显然，海森伯对这两个问题的回答都是否定的。为什么会是这样的呢？

牛顿给人留下了这么一个印象，以为在他的物理学中没有一个假设不是实验数据所必然要求的。当他提出他不作假说，并且他是从实验研究结果推出他的基本概念和定律时，就给人以这种印象。如果关于物理学家的实验观测同他的理论的关系的这种想法是正确的，牛顿的理论就永远不需要修正了，它也不可能包含实验未予证实的结论了。要是牛顿的理论是隐含在事实之中，它就

该象那些事实一样确凿和肯定。

然而，1885年迈克耳孙和莫雷所完成的实验①揭示了这样一个事实，如果牛顿的理论假设全是真理的话，这个事实就不应当存在。这个事实表明，物理学家的实验事实和他的理论假设之间的关系完全不同于牛顿引导许多现代物理学家去设想的那样。在大约十年以后，关于黑体辐射的实验迫使人们对牛顿关于他的研究对象的思想方法作又一次的改造，所以，这个结论就成为不可避免的了。肯定地说来，这意味着物理学理论既不仅仅是实验事实的描述，也不是可以从这样一种描述推论出来的某种东西；而是如爱因斯坦所强调指出的，物理学家只有通过思辨的方法才能得到他的理论。在物理学家的方法中，不是从事实推演到理论的假设，而是从假设的理论推演到事实和实验数据。因此，人们必须思辨地提出理论，并且用演绎法推导出这些理论的许多结果，以便使这些理论能够接受间接的实验检验。总之，任何物理理论所作出的物理假设和哲学假设，都要比仅仅由事实所给出和隐含的假设更多。由于这个理由，任何理论，随着同这个理论的基本假设不相容的新证据的出现（类似迈克耳孙-莫雷实验结果那种方式），要受到进一步的修正和改造。

并且，这些假设都带有哲学的特征。它们可以是本体论的假设，那就是涉及科学知识的对象的假设，这种对象是同它和感知者的关系无关的；或者它们也可以是认识论的假设，那就是涉及作为实验者和认识者的科学家同他所认识的对象之间的关系的假设。爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论由于根本改变了时间和空间以及时空同物质的关系的哲学理论，从而在本体论方面修正了现代物理学的哲学。量子力学，特别是它的海森伯测不准原理，给物理学家关于实验者同他的科学知识的对象之间的关系的认识论所

① 迈克耳孙和莫雷合作重做以太漂流实验是在1887年。——译者注

带来的变化是很显著的。这本书的最新奇也是最重要的命题也许就是本书作者的这样一个论点：量子力学已经把潜能的概念带回到物理科学中了。这使得量子论对于本体论也象对认识论一样重要。在这一点上，海森伯的物理哲学同怀特海(Whitehead)的物理哲学有一个共同的因素。

正是由于在物理学的研究对象中引入了潜能(这不同于物理学家的认识论范畴)，所以爱因斯坦反对量子力学①。他说："上帝是不掷骰子的"，以此来表示他的反对意见。这个陈述的要点是骰子游戏以机遇律为依据，而爱因斯坦认为，后一概念只有在有限的认识主体的认识论的局限性中才能找到它的科学意义，这种局限性存在于认识主体同包罗一切的科学知识对象的关系之中，因此，当在本体论上讲到那个对象本身时，那就是误用了。这个对象自身是无所不包的，因而在这个意义上是全知的(类似上帝那种形式)；对于任何有关这种对象的科学描述，机遇或者几率概念是不适当的。

本书之所以重要，是因为它包含了海森伯对爱因斯坦以及其他人对他的测不准原理和量子论的批评的回答。在理解这个回答时，必须记住两件事：(1)前面提到过的关于实验物理学的数据和它的理论概念之间的关系。(2)在(a)牛顿力学和爱因斯坦的相对论中和在(b)量子力学中，几率概念所起的作用的区别。关于(1)，爱因斯坦和海森伯，相对论力学和量子力学是一致的。只是关于(2)，他们才有分歧。然而，关于(2)，海森伯和量子物理学家同爱因斯坦发生分歧的理由，有相当成分取决于(1)，这是爱因斯坦也承认的。

---

① 说"爱因斯坦反对量子力学"是不合事实的。爱因斯坦曾经声明，他并不反对量子力学，但坚决反对量子力学的哥本哈根解释。关于这一点，海森伯在本书中所表述的理解还是比较正确的。——译者注

(1)断言物理学的实验数据不包含它的理论概念。由此可见，科学知识的对象决不是通过观察和实验去直接认识的，而只有通过思辨地提出的理论结构或公理假设才能认识的，这些理论结构或公理假设只有通过由它推演出来的结论间接地在实验上加以检验。因此，为了探知科学知识的对象，我们必须走向它的理论假设。

当我们为(a)牛顿力学或爱因斯坦的力学和为(b)量子力学去这样做时，我们发现，在量子力学中，几率或者机遇的概念进入了物理系统的态的定义，在这个意义上，也就是概念进入了它的对象，但在牛顿力学或者爱因斯坦的相对论中却不是这样。无疑，这正是海森伯在本书中所写的“量子论把潜能概念带回到物理科学中来了”这句话的意思。毫无疑问，这也是爱因斯坦反对量子论时心中所想的东西。

更具体地说，量子力学同以往的物理理论的差别可以表述如下：在牛顿的理论和爱因斯坦的理论中，只要经验地测定了在已定时刻表明系统中每个质点的位置和动量的数值，就可以准确地给出任何孤立力学系统在这一时刻的状态；不出现任何关于几率的数值。在量子力学中，关于观测一个系统的解释是一个颇为复杂的程序。观测可以是单独一个读数(它的准确度还必须加以讨论)，或者观测也可以包含一组复杂的数据，例如云室中水滴的照相；不管是哪一种情况，只能用几率分布(譬如说，关于系统的各粒子的位置和动量的几率分布)来陈述观测的结果。这样，理论就预言了未来时间的几率分布。当未来的态达到时，如果只是在单独一次观测中，动量和位置的数值处在预期的范围之内，那么，理论并没有在实验上获得证实。具有同样初始条件的同样实验必须重复许多次，而在每次观测中可以有所不同的位置或动量值，必须表现出与预期的几率分布相似的分布。总之，量子力学同爱因斯坦

力学或者牛顿力学的决定性区别集中在任何时刻一个力学系统的定义上，这种区别就在于量子力学在它对态的定义中引入了几率概念，而牛顿和爱因斯坦的力学却不是这样。

这并不意味着在牛顿力学或爱因斯坦力学中，几率就毫无地位。然而，它仅仅是在用以决定理论预测是否正确或不肯定的程度的误差理论中才有地位。因此，几率和机遇的概念仅限于科学家在证实他所认识的东西的认识论方面；它并不进入关于他所认识的东西的理论陈述。因此，在爱因斯坦的两个相对论和牛顿力学中，都满足爱因斯坦的格言“上帝是不掷骰子的”。

有没有什么办法可以裁决爱因斯坦同海森伯及其他量子理论家的论战呢？对于这个问题已有人作出了许多答案。有些物理学家和哲学家强调操作的定义，他们论证说：既然一切物理理论（甚至经典理论也是如此）都给人类留下了误差和不确定性，那就无法在爱因斯坦和量子理论家之间作出裁决。然而，这是：(a)忽视了科学方法中存在着用公理法构成的、构造性的理论定义，也存在着误差理论和操作定义；并且，(b)假设了几率概念以及更加复杂的测不准关系只是在操作定义的意义上进入了量子力学。海森伯指出后一假设是错误的。

别的科学家和哲学家走到了另一个极端，他们主张，仅仅因为在预测某些现象时有不确定性，这决不能构成“这些现象都不是完全确定的”这个命题的论据。这一论据将两个问题结合了起来，一个问题是定义力学系统在已定时间的态的静力学问题，另一个问题是预测这个系统的态随时间而变化的动力学问题，或因果性问题。但是，量子论中的几率概念只进入它的静力学，也就是只进入量子论关于态的理论定义。因此，读者将发现，把关于态的定义的静力学理论成分和态随时间而变化的动力学的（或因果性的）理论成份截然划分开来，那是明智的。对于前一种成分，几率概念和随

之而来的不确定性在理论上和原则上都进入了；它们不仅仅涉及操作上的和认识论上的不确定性和误差——这类不确定性和误差是由人类行为的有限性和不准确性所引起的，并对任何科学理论和任何实验总都是共同的。

但是，可以问，为什么应当在原则上把几率概念引进力学系统在任何静态时刻 t^1 的态的理论定义中去呢？在利用公理假设作出这样一种理论构造时，海森伯和其他量子理论家在同爱因斯坦争论时不是普遍地以本身尚待证明的假定作为自己的论据吗？这本书把这些问题的答案阐明如下：量子力学的程序的理由是上述命题(1)，这个命题是爱因斯坦本人也接受的。

命题(1)是我们只用公理的理论构造或假设的思辨方法来认识科学知识的对象；牛顿关于物理学家可以从实验数据推演出我们的理论概念的设想是错误的。由此可以推论出，断言科学知识的对象(或更具体地说，即力学系统在已定时刻 t^1 的态)必须以一种特殊方式来定义，是没有先验的或经验的意义的。唯一的准则是，当求得由理论推演出来的实验后果时，究竟哪一组关于力学对象的理论假设为实验数据所证实？

现在的情况是：当我们如爱因斯坦要求我们去做的那样，在理论上和原则上只用关于位置和动量的数值来定义亚原子现象的力学系统的态，并且推演出黑体辐射的结果的时候，关于力学系统的态和原子物理学的对象的这种理论假设已被实验证据证明是错误的。实验事实绝不是理论所要求的那样。然而，当通过引入普朗克常数并在原理中加入关于将发现有关的位置-动量数值的几率(由此导出测不准原理)的第二组数值，而把传统理论加以修正时，实验数据证实了新的理论概念和原理。总之，在量子力学中关于黑体辐射实验的情况同爱因斯坦所遇到的关于迈克耳孙-莫雷实验的情况是相同的。在这两种情况中，都只有通过引入在原则上

是新的理论假设，才能使物理理论同实验事实相一致。因此，如果按照爱因斯坦和上述科学哲学家的要求就应该断言：不管量子力学是怎样的，亚原子物体的位置和动量都是“真正”明确地处于空间和时间之中（因为它们只要用一对数字来表示就行了），从而在因果关系上，它们也完全是决定论性的，但是，要作这样的断言，就是要求人们承认已为黑体辐射实验证明是错误的一种关于物理知识对象的理论，所谓错误的意思是说，这种理论可以推演出来的实验结果没有得到证实。

当然，由此得不出结论说，不可能发现某种符合于以往的实验事实的新理论，在这理论中，几率的概念原则上不进入它的态的定义。例如，诺贝特·维纳(Norbert Wiener)教授认为，他找到了一些线索，可以作为这样一种理论遵循的方向。然而，这种理论必须拒绝以爱因斯坦理论的四维时空来表示态的定义，因此，它同爱因斯坦建立在其他基础上的命题是不相容的。无疑地，人们不能排除这样一种可能性。然而，除非提出了这样一种代替的理论，否则，任何一个人，只要他对关于科学知识的对象必须是什么的问题，不主张具有某种先验的或秘密的信息来源，那么，他除了接受量子论的态的定义，并赞同本书作者海森伯的观点，把潜能的概念复归于现代科学知识的对象，别无其他抉择。黑体辐射实验要求人们作出结论说：上帝是掷骰子的。

因果性和决定论在量子力学中的地位如何？也许外行人和人文科学家对本书的兴趣主要取决于它对这个问题的答复。

如果要理解这个答复，读者必须特别注意海森伯有关(a)上述求助于几率概念的态的定义和(b)薛定谔时间方程这二者的描述。读者也必须弄明白（而这也是一切任务中最困难的一项），当他问上述问题时，在他的心目中“因果性”和“决定论”二词的意义，和海森伯在说明他的答复时，这些词在海森伯的心目中所具有的意义

是否相同。否则，海森伯所回答的不是读者所问的问题，在读者方面就会发生完全的误

现代物理学允许因果性概念有两个不同的、科学上准确的意义，其中一个比另一个强，而在物理学家中间，对于应当使用"因果性"一词来表示这两个意义中的哪一个，并没有取得一致意见，因此，情况就更为复杂了。因此，某些物理学家和科学哲学家用这个词来表示两个意义中较强的一个。时常有这样的证据，至少海森伯教授在本书中的用法就是这样。其他的物理学家和哲学家，包括这篇序言的作者①，则用"因果性"一词表示两个意义中较弱的一个，而用"决定论"一词来表示较强的意义。如果按照前一种用法，"因果性"一词同"决定论"就成为同义语了。如果按照第二种用法，则每一个决定论性的系统都是一个因果性的系统，而每一个因果性的系统却不一定是决定论性的系统。

在这个题目的上述讨论中，已经产生了巨大的混乱，因为经常出现这样的情况：不论是提问题的人，或是回答问题的物理学家，都未曾仔细地说明在问题或回答中，他使用"因果性"这个词，究竟是用它较弱的现代科学意义，还是用它较强的意义。如果有人问："因果性在量子力学中成立吗？"而没有指明他是在较强还是较弱的意义上提出有关因果性的这个问题的，那么，人们会从有同样才能的物理学家那里得到显然相互矛盾的回答。在较强意义上使用"因果性"一词的一位物理学家，会十分正确地回答："不。"在较弱的意义上使用"因果性"的另一位物理学家会同样正确地回答："是。"自然，这给人产生了这样一种印象，以为对于答案究竟是怎样的，量子力学并不明确。然而，这种印象是错误的。一旦人们具体说明了他所说的"因果性"的意义，使得问题和回答都毫无歧义，量子力学的回答就不再是含糊的了。

---

① 即诺斯劳普本人。——译者注

由此可见，弄清楚“因果性”一词的可能的不同含义是重要的。让我们从外行人通常使用“原因”一词的用法开始，然后转到现代物理学中比较精确的意义，并且在中途考察一下亚里士多德的物理学中所说的意义。

人们可以说：“石头打中窗子使得(Caused)玻璃破碎了。”在“因果性”(Causality)的这种用法中，它被认为是对象之间的关系，即石头和窗玻璃之间的关系。科学家以不同的方式表示同一件事。他用石头和窗玻璃在它们相碰以前的时刻 t^1 的状态，和在它们相碰时以后的时刻 t^2 这两个对象所组成的同一系统的状态来描述上述那组事件。因此，外行人倾向于把因果性设想为各个对象之间的关系，而科学家则把它设想为同一个对象或者同一组对象在不同时间的不同状态之间的关系。

这就是为什么为了断定量子力学关于因果性所说过的话，人们必须注意两件事的原因。这两件事是：(1)规定任何物理系统在任何特定时刻 t 的状态的态函数；(2)将物理系统在较早的时刻 t^1 的态同它在任何可确定的较晚时刻 t^2 的不同的态联系起来的薛定谔时间方程。因此，海森伯关于(1)和(2)所说的一些话，必须小心翼翼地来阅读。

如果我们考察一既定物理对象或物理对象系统在不同时刻的态之间的关系可能具有的可能性质，会对于理解量子力学关于这种关系的论述有所帮助。关系最弱的可能情况应该是单纯在时间上相继的情况，在这情况中没有任何必然的联系，甚至也没有出现下面这样的事情的几率(不管多么小)：特定始态随着时间的流逝，会被一个特定的未来态所追随。为了使我们相信直接感觉的自然现象的一些感觉状态之间具有这样的性质，休谟(Hume)进行了论证。正如他所指出的，人们肯定感觉不到任何必然联系的关系。人们也不能直接感觉到几率。对于任何现象的相继状态，感觉所

给予我们的一切，仅仅是在时间上相继顺序的关系而已。

这一点具有头等的重要性。它意味着，要在任何科学或常识中，得到关于任何对象或者系统的相继状态之间关系的因果性理论，或者甚至只要得到一个几率理论，人们只能运用思辨的方法和由公理法构造起来、由演绎法系统阐述的科学与哲学理论，而这种理论不是直接用感觉材料和实验数据来检验的，而只能通过从它推演出的结果来间接地检验的。

关于任何物理系统在不同时刻的各个态之间的关系的特征的第二种可能性是一种必然的联系，但是人们只有认识了未来的态，才能知道这种必然联系是什么。要获得后一种关于未来态的知识，可以等它到来，或者可以观察过去类似系统的未来态或终态。如果情况是这样的话，因果性就是目的论的了。系统随时间的变化是由这个系统的终态或目的所决定的。物理系统在早期t^1时的状态是一颗橡子而在后期t^2时是一株橡树，这就是一个例子。这样两个状态之间的联系看来是一种必然的联系。橡子决不能变成枫树或大象。它们只能变成橡树。然而，给出在早期t^1时处于橡子状态的这种物理系统的性质，还没有科学家能够推演出系统在后期t^2时将具有的橡树的种种性质。亚里士多德的物理学就曾断言，一切因果关系都是目的论的。

另一种可能性是，在不同时间的任何对象或任何对象系统的态之间的关系是这样一种具有必然联系的关系，即知道了系统(假设是孤立的)始态，就能推演出这系统的未来态。用比较专门的数学语言来说，这意味着，存在一种间接证实了的、由公理法构造起来的理论，它的公设是：(1)指定一个态函数，它的独立变量完全规定了系统在任何指定时刻的态，(2)规定一个时间方程，把在任何早些时候t^1时这个函数的独立变量的经验数值和在任何特定的晚些时候t^2时它们的经验数值以这样一种方式联系起来，那就是把

操作上决定的t^1时的数值集引入时间方程，未来t^2时的数值只要用解方程的办法就可以推算出来。如果情况是这样的话，那么，各个态之间的这种时间关系就可说是给力学因果关系作出了例证。

应当注意，这个力学因果性的定义对于需要用怎么样的独立变量来规定系统在任何已定时间的态的问题，仍然悬而未决。因此，至少出现两种可能性：(a)几率概念可以用来规定系统的态，或者(b)不可以这样使用几率概念。如果(b)成立，态函数中就不出现同几率有关的独立变量，这时就存在着较强类型的力学因果性。如果(a)成立，同几率有关、也同位置、动量这类其他性质有关的独立变量就会在态函数中出现，这时就只存在较弱类型的力学因果性。如果读者心中牢记力学因果性的这两种意义，并且弄明白海森伯在本书的任何特殊句子中引用的是哪一种意义，那就应当能够得到有关现代物理学中因果性状况问题的答案。

决定论又是怎样的呢？也是这样，在物理学家和科学哲学家中间，关于这个词该如何使用，也没有一致的协议。按照常识的用法，它和可能最强的因果性相等同。因此，我们将把“决定论”一词只用来表示力学因果性的较强类型。这样，我相信，本书的细心的读者会对他的问题得到下列答案：在牛顿力学、爱因斯坦力学和量子力学中，与其说是目的论的因果性成立，不如说是力学因果性成立。这就是为什么把量子物理学称为量子力学，而不称为量子目的论的缘故。但是，既然牛顿物理学和爱因斯坦物理学中的因果性是属于较强的类型的，因而这种因果性既是力学的，又是决定论的；而量子力学中的因果性，是较弱的因果类型，因而是力学的，但不是决定论的。从后一事实可以看出，如果海森伯在本书中处处是在较强的、决定论的意义上使用“力学因果性”一词，并且提出这样的问题：“在量子力学中，这种较强意义的力学因果性成立吗？”那么，答案必定是“否”。

读者会发现，情况甚至比不同类型的因果性之间的这些初步区分所显示的还要复杂。然而,可以期望,对这些不同的意义予以集中的注意，会使读者能够找到比用别的办法更方便的办法来读懂这本异常重要的书。

这些区分还足以使人们抓住在现代物理学中引入较弱类型的力学因果性(这已出现在量子力学中)的巨大哲学意义。它的意义就在于将亚里士多德物理学中的客观的、并且在这个意义上是本体论的潜能概念和现代物理学中的力学因果性概念调和起来。

由此可见，如果读者由于海森伯强调了在量子力学中有某种类似于亚里士多德的潜能概念的东西，就下结论说当代物理学已把我们带回到亚里士多德的物理学和本体论，那该是一种错误。如果反过来作这样的结论:因为在量子力学中,力学因果性在它的较弱的意义上仍然成立,所以,现在在现代物理学中,在它的因果性和本体论方面，同量子论产生以前的情况完全一样。这个结论同样也是错误的。已经发生的事情是:在量子论中,当代的人已经越过古典的、中世纪的和近代的世界前进到一个新的物理学和哲学，它把两者的某些基本的因果性的假设和本体论的假设前后一致地结合起来了。这里，让我们回想起这样一点，就是我们使用“本体论的”一词去表示任何实验上证实了的科学理论的概念，这些概念涉及了科学知识的对象，而不仅仅涉及那种作为认识主体的科学家和他所认识的对象之间的认识论关系。当物理学家们发现,除非他们把几率的概念,从它在规定什么时候他们的理论在实验上被证实或不被证实时所扮演的牛顿式的和爱因斯坦式的、仅仅是认识论的、误差论的角色,扩大成为在理论公设中原则上被指定的、表征着科学知识对象本身的本体论角色,否则,就不可能从理论上说明康普顿效应和黑体辐射实验的结果;在这个时候,这样一种实验上证实了的关于本体论的潜能和本体论的力学因果性的

哲学综合(在后一概念的较弱的意义上)也就出现了。

海森伯在他听从于那种由实验和数学的考虑二者所强加给他的，使他以如此深刻的方式来修正中世纪和现代人的哲学和科学信仰的必要性之前,经历了本书所描述的那样一种主观感情经验，对此，我们用不着感到惊讶。对最富有创造力的时刻的人类精神的第一手描述感兴趣的那些人，会仅仅因为这个因素就会想读这书本。如果人们回想一下，甚至象爱因斯坦这样勇敢和富有创造精神的人物，也曾在迈出背离近代经典物理学的彻底决定论这一步时踌躇不前，人们就会赞赏迈出这一步的勇气了。爱因斯坦不允许上帝掷骰子;他认为,在科学知识的对象中不可能有如量子力学中较弱形式的力学因果性所允许的那种潜能。

然而，在人们作出"上帝已成为一个十足的赌棍，并且潜能存在于一切对象之中"这样的结论之前,必须注意到量子力学给它的力学因果性的较弱形式的应用所加的某些限制。为了体会这些限制，读者必须注意本书关于下述三方面的论述:(1)康普顿效应，(2)普朗克常数 h 和(3)用普朗克常数 h 来规定界限的测不准原理。

这个常数 h 是一个有关任何物体和物体系统的作用量子的一个数值。这个把原子性从物质和电扩展到光以至能量的量子是很小的。当被观测系统的各个量子数都很小，就像亚原子现象中的情形那样时，由海森伯的测不准原理所规定的系统质点的位置和动量的不确定性就变得可观了。从而,与态函数中位置-动量数值相联系的几率数值也变得可观了。然而，当系统的各量子数都很大时,海森伯原理所规定的不确定性就变得无关紧要,而态函数中的几率数值也可以忽略不计。这就是关于普通的大物体的情形。在这个时候,具有根本上较弱类型的因果性的量子力学,就作为它本身的一个特例，导致了具有较强类型的因果性和决定论的牛顿

和爱因斯坦力学。因此，当人类仅仅考虑普通的大物体时，较强类型的因果性就成立，从而决定论仍居统治地位。

然而，亚原子现象对于人类也是具有科学意义的。至少，对于这个领域，控制人类的因果性是属于较弱的类型，而人类把力学的宿命和潜能二者都体现了出来。有一些科学根据可使人相信这种情况甚至在遗传中也会发生。想在本书篇幅之外探索这个题目的任何读者可以看看爱尔文·薛定谔(Erwin Schrödinger)教授的《生命是什么?》① 一书，薛定谔是一位物理学家，量子力学的时间方程就是用他的名字命名的。无疑，潜能和较弱的因果性形式对于人类的无数其他特性也是成立的，特别是人的大脑皮层神经中枢的那些生理现象，那些现象在认识上是同人类的直接的内省观念和目的相关联的。

如果上述可能性成立的话，一个科学、哲学以至道德的难题就可以迎刃而解了。这个问题就是：力学因果性，甚至是它的较弱的形式即量子力学的因果性，如何同专门存在于人的道德、政治和法律目的中和他的身体行为(其中至少有一部分是由于上述目的)的有目的的因果决定中的目的论因果性调和起来？简单地说，海森伯在本书中详细阐述的物理哲学怎样同道德、政治、法律科学和哲学调和起来？如果在这里对某些把物理学因果性理论同人文科学和社会科学中的机械论和目的论之间的广泛关系关联起来的某些论文作一简要的介绍，可能有助于读者体会到为什么在这些较大问题能被正确理解和有效解答之前，必须精读这本书。这方面有关的论文是：(a)罗森勃吕特(Rosenblueth)、维纳(Wiener)、毕格罗(Bigelow) 等教授在 1943 年 1 月《科学的哲学》(*The Philosophy*

---

① 《生命是什么?》(*What is Life?*), University Press, Cambridge; MacMillan Company, New York, 1946。中译本见上海人民出版社 1973 年版。

of Science）期刊上的论文①；(b)麦克柯勒（McCulloch）和皮茨(Pitts)两博士在《数学生物物理学通报》(*The Bulletin of Mathematical Biophysics*）第5卷（1943年）和第9卷(1949年)上的文章；(c)本序作者(即F.S.C.诺斯劳普)编的、耶鲁大学出版社1949年出版的《意识形态分歧和世界秩序》（*Ideological Differences and World Order*）一书的第十九章。如果在读了本书之后再读上述文章，(a)将表明目的论因果性是怎样作为海森伯在这里描述的力学因果性的一个特例而出现的。同样(b)将提供一个用(a)的目的论力学因果性来表示的内省观念的神经关联的物理理论，从而对观念为什么能够对人的行为产生一种有因果性意义的效果作出解释。并且，(c)将表明人的道德、政治、法律观念和目的如何以(b)和(a)的方式，与海森伯在本书中如此透彻地描述过的物理潜能和力学因果性理论相联系。

还需要提醒读者注意的是海森伯教授关于玻尔的互补原理所作的论述。这个原理在玻尔、海森伯都包括在内的"哥本哈根学派"所作的量子论解释中起着重大的作用。某些量子力学的学者，例如马根脑(Margenau)在他的《物理实在的本性》② 一书中，都倾向于下述结论：量子力学仅仅需要它的态的定义、它的薛定谔时间方程和其他一些数学公设，就足以保证(如前所述)把爱因斯坦力学和牛顿力学作为量子力学的特例而从量子力学推导出来。按照后一个命题，互补原理是起因于人们不能在内心连续地保持较强或较弱的力学因果性，而把较强的形式最终归因于量子力学中只

① 即《行为、目的和目的论》一文，中译文见《自然辩证法研究通讯》编辑部编：《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆，1965年。——译者注

② 《物理实在的本性》(*The Nature of Physical Reality*), McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1950, pp. 418-22. 亦可参阅诺斯劳普 (Northrop), 《科学和人文学的逻辑》(*The Logic of the Sciences and the Humanities*), MacMillan, New York, 1947, Chapter XI.

包含较弱形式的那些部分。当这种情况发生时，必须引入互补原理以避免矛盾。然而，如果人们回避了上述实际，互补原理即使不成为无用的，至少也不过是一种形式，这样，人们要避免如马根脑所指出①并为玻尔所重视的那种危险，那就是以互补原理的名义，反复无常地玩弄矛盾律，给物理学和哲学问题以虚假的解决。

通过互补原理的使用，对于原子物理学的粒子图象的日常语言和其波动图象的日常语言所必须加上的限制都融合在一起了。但是一旦用那种由公理法构造起来的数学严密性来表述这个结果，互补原理的任何进一步使用都仅仅是当人们抛开量子力学的严格而又基本的数学假设，而沉湎于日常语言和波动与粒子的映象时的一种表面的方便。

为了使读者能够对海森伯在本书中关于物质实体和精神实体的日常概念和笛卡儿概念的论述作出有见识的判断，有必要深入到互补原理的不同解释中去。这是因为他所作的关于笛卡儿的结论来源于他把互补原理推广到物理学之外，首先推广到通常的生物学概念和数学物理学概念之间的关系上去，其次推广到肉体-精神问题上去。这种推广的结果是，笛卡儿的精神实体理论，正如一般实体概念一样，在本书中比本序作者所知的任何其他论述当代物理学的哲学的著作要运用得好得多。

例如，怀特海曾下结论说，当代科学和哲学没有实体概念的地位，也不需要实体概念。中立一元论者(Neutral monist)如罗素勋爵和逻辑实证论者如卡尔纳普(Carnap)教授也都同意这种看法。

一般地讲来，海森伯主张：在人们知道了那些使原子物理学问题完全阐明的精炼的概念之后，就没有强制性的理由要抛掉通常的生物学概念，或者数学物理学概念。因为原子物理学问题的阐明是完全的，它只同科学中一个范围很有限的问题有关，而不能使

① Margenau，同上书，p.422.

我们在其他地方避免使用许多经不起量子力学中所作的那种批判分析的概念。既然完全阐明的理想是不能达到的——重要的是，在这一点上我们不应当受骗——人们可以沉湎于日常概念的使用，如果使用日常概念是足够小心谨慎的话。在这方面，当然，互补性是很有用的科学概念。

在任何事件中，有两件事看来是明白的，它们使得海森伯关于这些问题所作的论述显得特别重要。第一件事是互补原理同肉体与精神的笛卡儿概念及日常概念在目前的有效性是共存亡的。第二件事是可能所有这些概念不过是方便的梯子，它们在现在或者将来总得被抛掉。即使如此，至少在关于精神的理论方面，这梯子必须一直留到这样的时候，在那时我们由于使用它而找到了语言学上更严格和经验上更令人满意的理论，使得我们可以抛掉笛卡儿的语言。诚然，关于精神的片段的理论并不求助于现有的实体概念，但是，这些理论的作者当中，除了怀特海，还没有人说明过，这种片段的理论的语言怎样才能同人类知识的其他事实的科学语言建立起相称的和相容的关系。因此，任何人，不管他是一个专业物理学家，还是一个哲学家，或者是一个外行的读者，如果他认为在这些重要问题上要比海森伯懂得更多，他就会冒巨大的风险去设想他有一个关于精神及其与肉体的关系的科学理论，可是事实上大概不会有这么一回事。

到此为止，我们集中注意了当代物理学的哲学关于科学知识的对象（作为不依赖于它和认识主体即科学家的关系的客体）所作的论述。简言之，我们已经讲到了它的本体论。这种哲学还有它的认识论成份。这种成份分为三个部分：(1)下述两方面的关系：(a) 给予物理学家（作为对他的观测和实验进行归纳的认识主体）的直接观测资料；(b)思辨地提出的、间接证明了的、用公理法构造起来的他的理论公设。后一项(b) 规定了作为客体的科学知识的

对象，因此给出了本体论。(a)和(b)之间的关系规定了认识论中的一个因素。(2)几率概念在误差论中的作用，利用误差论，物理学家可以规定一个准则，用以判断他的实验数据(由于人的实验误差)可以偏离理论公设所推演出来的结果到什么程度，而仍然可认为是证实了这个理论。(3)所进行的实验对于被认识的对象的影响。海森伯关于当代物理学的这三个认识论因素中的头两个因素所作的论述已在本序中着重说明了。还有待读者予以注意的是他关于第三项的论述。

在量子力学以前的现代物理理论中，(3)不起任何作用。因此，那时现代物理学的认识论只需(1)、(2)就完全被说明了。然而，在量子力学中，(3)[以及(1)和(2)]变得很重要了。当被观测的对象的量子数是很小时，观测动作本身就会改变被观测的对象。

从这个事实出发，海森伯对有关观测对象、进行观测的物理学家、以及宇宙的其余部分三者之间的关系作出了很重要的结论。如对下列关键性论点予以注意，就能够体会这个结论。读者可能还记得，在本序前面所作的若干关于力学因果性的定义中，加了限制词"对于一个孤立系统"；在其他地方它是隐含的。这种限制条件在牛顿和爱因斯坦力学中原则上可以得到满足，而且在实际上，通过精益求精的观测和人们的实验仪器的改善，也可以得到满足。然而，在量子力学中关于科学知识对象的态的定义中，几率概念的引入，在原则上而不仅是在实际上(由于人的观测和仪器的不完善)不允许满足"物理学家知识的对象是一个孤立系统"这一条件。海森伯还说明，把实验仪器、甚至把进行观测的物理学家的眼睛也包括在作为认识主体的知识对象的物理系统之内，也帮不了什么忙，因为，如果量子力学是正确的，那么，一切对象的态在原则上都必须用几率概念来定义。因此，只有当整个宇宙包括在科学知识的对象之内，限制条件"对于一个孤立系统"才能够得到满足，并且

即使对于力学因果性的较弱形式也能满足。很清楚，本书证明当代物理学的哲学在它的认识论方面和它的本体论方面一样新奇。确实，正是由于它的本体论的新颖——潜能和较弱形式的力学因果性的前后一致的统一——才产生了它的认识论的新奇性。

毫无疑问，另一件事也是清楚的。现代物理学的一些由实验证实了的特殊理论，对它们关于人类知识对象及其与认识主体的关系的论述所作的分析，展示了一种非常丰富多采的本体论和认识论哲学，它是科学理论和科学方法本身的一个主要部分。因此，物理学既不在认识论上也不在本体论上中立。否认物理学家理论的任何一个认识论假设，就没有科学方法可以检验理论关于物理对象所作论述究竟是真是假(指在经验上是否被证实的意义上)。否认任何一个本体论假设，在用公理法构造起来的物理学家理论的数学公设中，就没有足够的内容可以允许推演出实验事实，而提出这些实验事实是为了进行预测、作出始终一致的对应并且作出解释。因此，实验物理学家在多大程度上向我们保证他们的当代物理理论间接地在实验上被证实了，那么在事实上(*ipso facto*)，他们也就在同样程度上向我们保证这个理论的丰富多采的本体论和认识论哲学已被证实了。

当这种从经验上证实了的自然科学中的关于“真”的哲学同人文学和社会科学中关于“善”和“正义”的准则打成一片时，人们就有了伦理学和法学的自然律了。换句话说，人们有了一个具有科学意义的认识标准和方法，它可用来判断成文法律中那种字面上的关于个人和社会的规范，也可以用来判断那种体现在实际的人的风俗、习惯和传统文化制度以及世界文化中的活生生的社会精神。这种新的物理哲学同一些有关的人类文化哲学相结合，是今天和明天的世界的主要事件。正是在这一点上，本书中的物理哲学同它与物理学的社会后果的重要关系结合在一起了。

本书的一些章节曾于1955至1956年间冬季学期在圣安德鲁兹(St. Andrews)大学的基福特(Gifford)讲座上宣讲过。按照基福特讲座创立者的意志，这个讲座应当“自由地讨论所有下面这类问题：人类关于上帝或者无限、它们的起源、自然和真理的概念，人类是不是能够有任何这类概念，上帝是不是要受到任何限制，那是些什么限制，如此等等”。海森伯的这些讲演并不试图涉及这些最普遍和最困难的问题。但是，他的这些讲演力图远远超越一门专门科学的有限范围，而深入到那些由于自然科学新近的巨大发展和影响深远的实际应用所引起的关于人的一般问题的广阔领域中去。

科学真理和宗教真理[1]

我感谢您们给我的荣誉，这是和罗曼诺·瓜尔迪尼（Romano Guardini）[2]的名字相联系的。这对我特别亲切，因为瓜尔迪尼的精神世界早在我青年时期就给我以深刻的影响。当我还是一个青年人的时候，我读了他的著作，通过他的评介来看陀思妥耶夫斯基作品中的人物，后来我又很幸运地与他有个人的交往。瓜尔迪尼的世界是宗教的世界，而且是彻底的基督的世界，乍看起来似乎很难找到它与科学的世界之间的联系，而我从学生时代起就在科学的世界之中从事工作了。你们都知道，在科学的发展过程中，自从对伽利略的著名审判以来，人们已一再地表示了这样的意见，即科学真理不能与对世界的宗教解释相调和。尽管我深信科学真理在它自身的领域内是不容置疑的，但是我决不能排斥宗教思想的内容，不能认为它只是我们曾经经历过的人类意识的一个阶段而在将来我们就可以排除这部分内容。所以在我一生中，我不得不持续不断地思考这两个精神世界之间的关系，因为我从来不能够怀疑它们两者所指示的真理。我想在我这个讲话中首先谈谈科学真理价值的不容置疑的特性；然后谈谈更广泛的宗教领域，这里要涉及到瓜尔迪尼以如此令人信服的方式论述过的基督教；最后，——这将是最难以表述的方面——谈谈两种真理彼此之间的关系。

关于现代科学的开始，即哥白尼、伽利略、开普勒、牛顿的发

---

① 这是海森伯于1973年3月在慕尼黑接受巴伐利亚天主教科学院瓜尔迪尼奖时的演说。——译者注

② 罗曼诺·瓜尔迪尼（1885—1968），是德国著名天主教宗教哲学家和作家。——译者注

现，人们通常是这样说的，圣经和教会神父的著作中所断言的宗教天启的真理曾支配了中世纪的思想，这时被补充以感觉经验的实在，它可以由每个人的健全的五官加以检验，如果检验时足够小心，其结果是无可怀疑的。但是这种最初的描述新思想的方法只对了一半，它忽略了某些十分重要的因素，忽视了这些因素，我们就不能理解这种新思想的力量。现代科学的开始是同否定亚里士多德而接受柏拉图相联系的，这决不是偶然的。早在古代，亚里士多德作为一个经验论哲学家，就曾经抨击过毕达哥拉斯派（而我们必须把柏拉图算作其中的一个）不是从事实寻求解释和理论，而是根据某些理论和所珍爱的观念来摆弄事实，而且我们可以说，他们把自己看成是参与给宇宙以形状的（我在这里基本上是引用亚里士多德的原话）。事实上，新科学并不象亚里士多德批评时所主张的那样直接来自经验。我们只要想一想对行星运动的理解。直接的经验教导我们，地球静止不动而太阳绕它运转。今天，我们甚至可以以更极端的形式说，"静止"一词是由地球静止着这个陈述来定义的，并且我们把相对于地球是不动的每一物体描述为静止的。如果对"静止"一词作如此理解——而这是普遍接受的意义——那么，托勒密是对的，哥白尼却错了。只有当我们沉思了"运动"和"静止"的概念，并把运动理解为至少是关于两个物体的关系的陈述，我们才能够把关系倒转过来，使太阳成为行星系的不动的中心并获得一个简单得多、也更统一的关于行星系的观点，后来牛顿充分评价了这种观点的阐明的力量。因此，哥白尼把一个全新的要素加到直接经验之上，我称这个要素为"自然定律的简单性"，而它与直接经验毫无关系。从伽利略的落体定律可以看到同样的情况。直接的经验教导说，轻的物体比重的物体落得更慢些。可是，伽利略主张，在真空中一切物体落得同样快；而且它们的降落运动可以用数学表述的定律，即伽利略的落体定律，作正确的描述。那时还不可

能观测真空中的运动。直接经验的位置被经验的理想化形式所取代，而这成了理想化的正确形式，在这种形式中可以使数学结构在现象中显现出来。毫无疑问，在现代科学的早期阶段，对新发现的数学定律产生了最大的信心。这些数学定律是神的意志的明显的表示——我们从开普勒的著作中读到这句话——并且开普勒对他自己是第一个认识到神的创作之美的人而感到狂喜。由此可见，这种新思想与排斥宗教毫无关系。即使新的发现确实在某些地方违背了教会的教义，但是如果一个人能够如此直接地体验上帝在自然界中的创造，上述违背就无关紧要了。

当然，我们在这里所说的上帝是安排秩序的上帝，我们不知道他是否等同于我们祈求的上帝，我们把生命归之于他的上帝。所以，我们或许可以说，过去的着重点是在神的创造的这一部分，因此产生了失去整体观点、广泛联系的观点的危险。但这也是新科学取得巨大成果的真正理由。哲学家和神学家关于事物的广泛联系谈了那么多，以致于在这个题目上没有多少新东西可讲了；经院哲学已经为思维过程耗尽了精力。但是很少有人深入自然事件的细节。这是少得多的人物能够作出贡献的那种工作，此外——也考虑到关于这些细节的知识有某些实际的用途。在当时出现的某些学会中，只讨论观测到的细节，而不讨论广泛的联系，几乎成了一个神圣的原则。他们处理的不是直接经验，而是理想化了的经验，这一事实导致新的实验和量度技术，作为一种接近理想情形的方法，它可以得出总可能与实验结果相符合的结论。这当然不如在以后几个世纪显得那么明显；因为它假定在同样条件下总是发生同样的事情。人们开始发现，如果人们可以通过仔细地选择实验条件并与外部世界相隔绝而创立某种现象，那么支配这些现象的定律就会以纯粹的形式出现，而现象则由明确的因果性所决定。这提高了对事件的因果性过程的信任，人们认为它是客观的并且

不依赖于观测者的，这成了新科学的基本假设。你们都知道，几个世纪以来的事实已经证明了这个假设的价值，而只是到了最近，我们通过关于原子的实验才被迫认识到这种方法的极限。即使把这一经验记在心中，我们似乎仍有一个不容置疑的真理标准。可重复的实验的自然界最终总是使人们同意自然界的真实的行为。

随着这种新科学的总方向，我们看到后来时常讨论的特征的开端，这就是对定量的强调。要求准确的实验条件和精密的量度，要求精密、明确的语言和一种理想现象的数学表示，决定了这种科学的特征，并给予它以“精密科学”的名称。这个名称有时是褒义词，有时是贬义词。如果强调它的陈述的可靠性、严密性和不容置疑性，这是褒义词。如果这意味着它不适用于大量性质不同的经验，它的范围过于狭窄，这是贬义词。我们今天的科学技术面貌是由它发展过来的，比以往进步得多了。我们只要想一想登月所要求的极端准确性、几乎是难以想象的可靠性和准确性，就可以认识到现代科学要求多么牢固地奠基在真理之上啊。

但是我们当然要问这样的问题：这样集中注意实在的一个局部的方面，并且局限于实在的特殊部分所获得的这些成就，究竟有什么样的价值？我们知道我们这一代对这个问题作出了相互冲突的回答。我们读到了科学的善恶相克。我们知道在世界的哪些部分，把科学和技术成功地联系起来了，贫苦阶级的物质贫困已经大部分消除了，现代医药已经防止了成百万人因病死亡，交通和电讯已使生活方便多了。另一方面，科学可以被误用来发展具有最可怕的破坏力的武器；技术的优先发展损害并威胁了我们的生存空间。但是除了这些直接的威胁，我们的价值（伦理标准）也改变了，对物质生活的富裕这一狭窄领域注意过多，而生活的其他方面却被忽视了。虽然科学技术只能用作达到某个目的的手段，但其结果却决定于使用它们的目的是否善良。目的不能由科学技术内部

来决定。我们必须从整个人类和人类的整个实在的观点出发，而不是从它的一小部分出发来作出决定，否则我们将完全误入歧途。关于这个实在包含了许多我们还没有讨论过的东西。

首先，事实是人类只能在人类社会关系中发展他的智力。区分人类与其他生物的真正本性是他超越纯粹感觉并珍视其他东西的能力，这些本性是以他是能说话并能思维的人类社会的一部分为基础的。历史教导我们，这样的社会不仅具有物理的形式，而且具有精神的形式，但是在我们所知的精神形式中，除了直接可见的和可感知的，人们试图寻求有意义的与整体的联系，这种意图几乎总是起着决定性的作用。只是在这种精神形式之中，在社会上有效的“学说”之中，人们才发现了他们自己行动的指针，而这里不仅是反映外部状况的问题；正是在这里首次决定有关价值（伦理标准）的问题。但这种精神形式不仅决定一个社会的伦理学，而且决定它的整个文化生活。只有在这里我们看到了真、善、美的密切关系；只有在这里我们可以谈论个人生活的意义。我们称这种精神形式为社会的宗教。这里赋予宗教一词的意义比通常理解的要更广泛一些。这意味着包含各种文化和不同时期的精神内容，甚至包含上帝的概念尚未出现的时期。只有在现代的极权国家中（那里完全排斥先验的东西）所采取的社会思维形式中，才可能怀疑宗教一词是否还能有益地运用。

瓜尔迪尼在他的有关陀思妥耶夫斯基的人物的书中论述了一个人类社会的形式和其中的个人生活如何打上了宗教的印记，关于这个问题很难有人比他叙述得更好了。这些人物的生活在每一瞬间都充满了为宗教真理的斗争；它好象是渗透了基督教精神，所以这些人在行善的斗争中的胜败并没有多大影响。即使他们之中的最大的恶棍还知道什么是善和恶，并且他们也按照基督教的信仰给予他们的伟大榜样来指导他们的行动。通常的一种反对基督

教的意见，即认为基督教内的人和教外的人行为一样可怕，在这里就不成立了。当然，这种情况不幸是真有其事的，但是留在基督教内的人有明确的分辨善恶的能力；而且因为只有在那里我们有这种分辨善恶的能力，所以我们才有进步的希望。如果没有榜样来指引道路，我们就失去了价值（伦理标准）的尺度，随之也就失去了我们的行动和忍受痛苦的意义，最后的结果只能是否定和失望。所以宗教是伦理的基础，而伦理是生活的先决条件。因为我们每天必须作出决定，我们必须知道决定我们行动的价值（伦理标准），或者至少隐约地想到它们。

在这里我们看到了真正的宗教（在其中精神世界，万物的中心的精神秩序起着主要的作用）和更局限的思维形式，特别是当代的思维形式（它只与人类社会的经验方面有关）之间的特征性区别。关于后一种思维形式，我们在西方世界的自由民主中找得到，我们在东方的极权国家制度中也找得到。在这里也形成了一种伦理学，但只涉及道德行为的规范，而这种规范是从对直接可见的经验的观察推论出来的。宗教本身并不讲规范，而是讲指导性理想，我们用这些指导性理想指导我们的行为，而且我们至多也只能接近这些理想。而这些指导性理想并不是以直接可见的世界为基础，而是以在它之后的“王国”为基础，这个王国柏拉图称之为理念的王国，而圣经的说法是“上帝就是一种心灵”。

但是，宗教不仅是伦理的基础；它首先是信任的基础，这我们也可以从瓜尔迪尼那里学到，正如我们在儿童时期学语言一样，感到语言中所包含的理解是人们之间信任的最重要部分，所以宗教的形象和比喻是一种诗的语言，它在世界中，在我们存在的意义中产生信任。有许多不同的语言这一事实并不是障碍，我们似乎是由于机遇而生于某种语言或宗教的社会并带有它们的印记这一事实也不是障碍。唯一重要的是我们被引向世界中的这种信任，而

这种信任可以在任何语言中碰到。对于俄国人，例如，他出现在陀思妥耶夫斯基的小说中，瓜尔迪尼写到了他，上帝在世界中的创造物是被持续不断地重复的直接经验，所以他们的信任是被持续不断地更新，甚至生理的需要似乎也以它们的方式牢固地坚持着。

最后，如我曾经说过的那样，宗教对于艺术也是最为重要的。如果，象我们前面所说的那样，我们称宗教仅仅是与人类社会有关的精神形式，那么几乎自然地会认为艺术必然是宗教的一种表现。看一看各种文化史就可以知道，我们事实上能够最直接地从现存的古代艺术作品确定那个时代的精神形式，即使我们已不再知道表现这些精神形式的宗教教义。

但是我在这里关于宗教所说的一切对于与会的您们是早已熟知的东西。我之所以重复叙述它，只是为了强调：一个科学界的代表，如果他努力思索了宗教真理和科学真理的关系，也必须承认宗教的无所不包的意义。自从十七世纪以来，这两种真理相互冲突的事实已对欧洲思想史产生了决定性的影响。人们普遍认为冲突的开端是罗马宗教法庭在 1616 年对伽利略的审判，当时的争执是哥白尼学说，几星期之前我们刚庆祝了哥白尼诞辰 500 周年。我必须更深入地谈一谈这个开端。伽利略主张哥白尼学说，按照这个学说——与当时占统治地位的托勒密的世界观相对立——太阳停留在行星系的中心，地球绕太阳运转，24 小时转一圈。伽利略的学生卡斯泰利提出了这样一个论点：神学家对圣经的解释必须与已证实的科学事实相一致。这样一种说法可以被认为是对圣经的一种攻击，多明尼加的神父卡奇尼和洛林尼把问题提交宗教法庭。在 1616 年 2 月 23 日的审判中，哥白尼的两个论点被宣判为在哲学上是荒谬和异端的，这两个论点就是：第一，“太阳是世界的中心，因此是不动的”；第二，“地球不是世界的中心，不是不动的，而是天天在转动着。”经过教皇保罗五世的批准，贝拉尔明

主教受命去规劝伽利略放弃哥白尼学说。如果他拒绝放弃，主教就要下令不许讲授这样一种学说，不许为它辩护，也不许讨论它。伽利略相当忠诚地服从了这个命令，但是在教皇乌尔班八世即位以后，他认为他可以继续公开地进行他的研究了。在1632年出版了著名的论战性的《对话》之后，引起了第二次审判，在这次审判中伽利略必须宣誓放弃一切形式的哥白尼学说。今天我们对审判的细节并不感兴趣，对双方的缺点也没有兴趣。但是我们能够也必须探索冲突的更深一层的缘由。

首先，重要的是双方在内心都明确相信他们自己是正确的。教会的权威和伽利略都同样相信很高的价值(伦理标准)处于危险之中，保卫这些标准是他们的责任。如我前面提到过的那样，伽利略通过仔细地观测地球上和天空上的现象，体验了落体和行星的运动，数学定律变得很明显，它使得以往不知道的现象的简单性程度变得明白可见了。他已认识到从这种简单性产生新的理解的可能性，我们能够在现象世界的永恒秩序中得出局部的体系。哥白尼对行星系的解释比传统的托勒密解释要简单；它允许一种新的理解，而伽利略无论如何也不愿意放弃他对神的秩序的新见识。相反教会则相信，不应该动摇许多世纪以来作为基督教思想不可分割的一部分的世界观，除非有十分令人信服的理由使人不得不这样做。不论是哥白尼或是伽利略都提不出十分令人信服的理由。事实上，这里争论的哥白尼学说的第一个命题，十分肯定是错的。今天的科学也不会说太阳是世界的中心，因而是不动的。在第二个讨论地球的静止位置的命题中，人们必须首先解释“静止”和“运动”二词的意思。如果人们给予它们一个绝对的意义，就象朴素的思想所认为的那样，那么它只是一个定义：地球是静止的。不管怎样，我们是在这个意义上用这个词，而不是在别的意义上。如果我们认识到这些概念没有绝对的意义，它们涉及的是两个物

体之间的关系，那么人们是否把太阳或地球看作静止或在运动都没有什么关系。在这种情况下确实没有什么理由要改变旧的世界观。

还有，我们可以设想，宗教法庭的成员在简单性概念之内还包含着权力的观念，而伽利略自觉或不自觉地主张简单性概念，这从哲学上来看是从亚里士多德回到柏拉图。法官们显然也极大地尊敬伽利略的科学权威；因此他们并不希望阻挠他作进一步的研究，但是他们希望防止不安定和不确定的因素影响传统的基督教世界观，这种世界观在中世纪社会中起过如此决定性的作用，而且还继续起着这种作用。科学发现，特别是当它们还是新发现时，常常还要改变；最终的判定大多要在几十年的检验之后才能作出。为什么伽利略不应该等待一下，晚一点发表他的作品呢？因此我们必须恢复宗教法庭的名誉，他们在第一次审判时试图作出一种和解，并且通过了一个我们很容易接受的判决。但是一旦后来伽利略超越了第一次审判给他的科学活动规定的界限，第二次审判就使这样一些人占了上风，他们认为使用权力比作出和解要更为简单，所以对伽利略作出了影响极坏的严厉判决，它对以后的教会有十分巨大的损害。

今天有这样一种议论：作为一个社会的精神结构一部分的世界观曾经在使社会生活和谐方面起过重要的作用，人们不应该过早地把不安定和不确定的因素带入这种世界观。我们究竟应该给这种议论以怎样的评价呢？许多激进分子今天会用嘲笑反对这种议论；他们会提出这样的论据；这仅仅是保存腐朽的权力结构的问题，相反，人们应该试图尽可能快地实现变革或瓦解这些权力结构。但是必须提醒这些激进分子，科学同占统治地位的哲学之间的冲突在我们这个时代仍在进行，特别是在把辩证唯物主义选作思想基础的极权国家内。因此，苏联的官方哲学在与相对论和量

子论搞好关系之前曾经历了一段艰难的时期；在宇宙学方面也有过厉害的意见冲突。最后，在1948年，在列宁格勒开了一次关于天文学的意识形态问题的会议，试图通过讨论和协议澄清争论问题，并引向和解的道路。

这里基本上不是事实问题，正如对伽利略的审判一样，而是社会的精神形式（它在本性上是静态的）和科学的经验和思想形式（它们是持续不断地扩展和更新的，因此具有动态的结构）之间的冲突。即使一个社会是经过巨大的革命动荡而产生的，它仍力求巩固它那种要成为新社会的永恒基础的精神根源。可是，科学却为扩展而斗争。即令人们要用自然科学或者某些其他学科作为活的哲学的基础，——而在辩证唯物主义中人们也尝试着某种类似的东西——那它也只能是过去几十年或几个世纪的学科，并且它一旦用语言固定下来，那就又成为以后的冲突的基本条件。所以一开始就通过更广范围的形象和比喻来阐明它，运用诗的语言〔它是对所有人类的价值（伦理标准）都开放的，充满着活生生的象征〕，而不是运用科学的语言，似乎还更好一些。

尽管有这些一般的困难，我们必须回过头来考虑关于审判伽利略的事实问题。哥白尼对某些天文观测的解释不同于托勒密，这对基督教社会重要吗？是否天空中有水晶球，是否行星木星被一些卫星所环绕，是否地球或太阳是宇宙的中心，这些问题对于基督教徒个人的生活基本上没有什么关系。对于个人来说，地球确实位于中心，它是他的生存空间。但它又不全是无关紧要的。两百年后，歌德仍以恐惧和敬慕的心情谈到人们承认哥白尼体系时必须作出的牺牲。他作出了牺牲，但不是心甘情愿的，虽然对他自己说来，他深信这个学说的正确性。也许罗马宗教法庭的法官们已经猜疑到，伽利略的科学可能引起向危险的方向变化。当然，他们可能并不否认象伽利略或开普勒那样的自然界的探索者发现了

现象中的数学结构，把神的世界秩序的部分结构揭示了出来。但是关于光耀夺目的部分的这种观点或许会使得关于整体的观点显得暗淡无光；它可能带来这样的后果，当与整体联系的观点在个人的意识中消失时，社会的内聚的感情就受损害了，并受到衰败的威胁。随着受技术支配的过程取代天然的生活条件，个人与社会之间的疏远也发生了，而这就带来了危险的不稳定性。在贝尔托耳特·布莱希特的剧本《伽利略》中，一个修道士说："反对哥白尼学说的教令启示我了解到人类在太缺少控制的科学研究中所包含的危险。"我们不知道这种考虑是否在当时已起了作用；但是自那时以来，我们已经知道这会带来多大的危险。

我们还可以从科学在基督教铸造的欧洲世界中的发展学到更多的东西，我希望在我讲话的最后一部分讨论这个问题。前面我已经试图说明，用宗教的形象和比喻，我们有了一种语言，它使我们理解在现象之后的可领悟的有秩序的世界，而没有这种语言我们就没有伦理学和价值(伦理标准)的尺度。这种语言在原则上同任何别的语言一样是可以取代的；在世界的其他地方，现在有、过去也有过别的语言，它们也帮助人们去理解。但是我们生在一个特定的语言地区内。这种宗教语言与诗的语言的关系比它与那种以准确性为目的的科学语言的关系更为密切。因此两种语言中的词常常意指着不同的东西。圣经中的天堂(heavens)与我们把飞机与火箭送上去的天空(heavens)很少共同之点。在天文学宇宙中，地球只是无数银河之一中的一小点尘埃而已，但对于我们它将是世界的中心——它真正是世界的中心。科学试图赋予自己的词以客观的意义。但宗教语言却必须避免把世界分为它的客观方面和主观方面的这种区分；因为有谁会说客观方面比主观方面更重要呢？我们不应当混淆两种语言；我们应该用一种比人们过去惯用的思考方法更聪明的思考方法去思考。

而且，近一百年来科学的发展在它自己的领域中产生了这种更聪明的思考方法。自我们不再以直接经验的世界、而以一个我们只有用现代技术的工具才能深入进去的世界作为我们的研究对象以来，日常生活的语言不再适用了。当然我们最终能够在数学公式中表示这个世界的形式结构，从而实现对这个世界的理解；但当我们要谈论它的时候，我们必须使用形象和比喻几乎就象宗教语言中的形象和比喻一样，所以我们已经学会更谨慎地使用我们的语言，并且认识到表面的矛盾可能来源于语言的不适用性。现代科学已经揭示了一些范围宽广的定律，比伽利略、开普勒所揭示的定律适用范围要广泛得多。但是现代科学也已证明，随着对现象解释的广泛程度和抽象程度的增多，理解的困难也增长了。甚至关于客观性的要求，过去长时期来被认为是一切科学的前提，现在在原子物理学中也受到下例事实的限制，即不再可能把一个受观测的现象完全与它的观测者相分离。哪里还有科学真理与宗教真理之间的矛盾呢？

在这个问题上，物理学家沃耳夫冈·泡利有一次谈到两个对立的极端概念，二者在人类思想史上都极其富有成果，虽然它们哪一个也不符合于真正的真理。一个极端是客观世界的概念，它在时空中按照不依赖于任何观察主体的规律而运动；这是现代科学的指导原则。另一极端是主体的概念，它神秘地体验了世界的统一，它不再面对着任何客体，也不面对客观世界；这是亚洲人的神秘主义。我们的思想大致在这两个对立的极端概念之间摆动；我们必须承受这两极产生的张力。

谨慎地把宗教语言和科学语言区分开，也可以避免由于混淆它们而减少它们的内容。已经证实了的科学结论的正确性应当合理地不受到宗教思想的怀疑，反之亦然，发自宗教思想内心的伦理要求不应当被科学领域的极端理性的论证所削弱。无疑，随着技

术能力的扩展，产生了不容易解决的新的伦理学问题。我可以举一些例子，例如一个科学家对他的研究成果的实际应用要负什么样的责任？或者在现代医学领域中提出的甚至更困难的问题：一个医生应该或者可以把一个垂死的病人的生命延长多久？对这样一些问题的考虑决不是要削弱伦理原则。但是我也不能设想这样一些问题仅仅用实用的权宜之计就可以解决。或许在这里有必要采取整体的观念：即用宗教语言表示的做人的基本态度，它是伦理原则的渊源。

或许今天我们有可能重新更正确地来分配着重点，这些着重点由于近百年来科学技术的巨大发展而失调了。我所谓的着重点是指我们对人类社会中的物质条件和精神条件的重视程度。物质条件是重要的，当技术和科学提供了机会时，社会有责任去消除广大人民群众在物质上的匮乏。但当做到了这一点时，仍留下许多苦难，并且我们已经看到，个人是多么需要一个社会的精神方面能够提供给他的保护，不管他是自觉地要求还是认为理所当然。或许我们最重要的任务正在于此。如果在今天的青年学生中有许多不幸，那么原因不在于物质上的贫乏，而是在于缺乏信任，这使得个人难以为他的生活找到目的。所以我们必须尝试着去克服孤立，它威胁着生活在被技术的实际需要所支配的世界中的个人。心理学问题或社会结构的理论考虑也没有多大帮助，除非我们通过实际的行动在生活的精神和物质领域方面重新成功地实现自然的平衡。这是在日常生活中恢复深藏在社会的精神方面的价值（伦理标准），并赋予这些价值（伦理标准）以如此巨大的光辉，使人们把它们当作他们自己个人生活的指针。

但是我的任务不是谈论社会；我应该讨论的是科学真理与宗教真理的关系。科学在近百年内作出了巨大发展。在这个发展过程中，我们用宗教语言谈到的生活的更宽广的范围被忽视了。我

们不知道我们是否会成功地以老的宗教语言来表示我们未来社会的精神形式。理性主义地玩弄词句没有多少用处；诚实和方向是我们最需要的东西。但是，既然伦理是人类社会存在的基础，并且伦理只能从最基本的做人的态度（这种做人的态度我称之为人类的精神方面）中得到，那么我们必须都作出种种努力，和青年一代建立共同的做人的态度。我深信，如果我们又能够在两种真理之间重新找到正确的平衡，那么我们在这方面就能够取得成功。

〔译自西德《总汇》(Universitas) 1974 年第 1 期〕

量子论历史中概念的发展

普朗克在一次关于物理学发展的演讲中说过:“在科学史中，一个新概念从来都不会是一开头就以其完整的最后形式出现，象古希腊神话中雅典娜一下子从宙斯的头里跳出来那样。”物理学的历史不仅是一连串实验发现和观测，再继之以它们的数学描述的序列,它也是一部概念的历史。为了理解现象,第一个条件就是引入适当的概念。只有借助于正确的概念，我们才能真正知道观察到了些什么。当我们进入一个新的领域时,常常需有新的概念。照例,新的概念总是先以不甚清楚、不很全面的形式出现。之后它们被修改,有时几乎被完全抛弃,并为一些更好的概念所取代,最后才成为清晰而明确的概念。我准备用三个实例来说明这种发展,这三个实例对我自己的工作一直是重要的。第一个是分立定态的概念，这显然是量子论中的一个基本概念。其次是态——不一定是定态或分立的态——的概念，它是只有在量子力学和波动力学发展了以后才能理解的概念。最后,与前面二者紧密连系着的,是基本粒子的概念,这是直到现在还有争议的概念。

分立定态的概念是尼尔斯·玻尔于 1913 年引入的。这是他的原子理论的中心概念，它的意思玻尔用如下的话作了说明:“必须弄清楚，这个理论不打算在以往的物理学中所使用的‘解释’一词的意义上来解释现象。它只打算把各种看来不相联系的现象联结起来,并指出它们是有联系的。”玻尔说,只有在建立起这种联系以后，才有希望给出一种在以往物理学中所指的“解释”那种意义上的解释。必须联系起来的现象主要有三个。第一是原子的稳定性这个奇特的事实。一个原子可以受到扰动,这种扰动或者由于化

学过程，或者由于碰撞，或者由于辐射，或者由于其他任何原因，然而它总得回到它的原来的状态——它的正常态。这是以往的物理学不能满意地解释的一桩事实。其次是光谱定律，特别是有名的里兹定律：一个光谱中谱线的频率可以写成光谱项之差，这些光谱项必须看作是原子的特征性质。最后是卢瑟福的实验，这些实验引导他得出了他的原子模型。

上面这三组事实必须联结起来，而我们知道，分立定态的观念就是把它们联结起来的出发点。首先，我们不得不相信，原子处在分立定态的行为能够用力学来解释。这是必要的，否则就同卢瑟福模型联系不起来，因为卢瑟福实验是以经典力学为根据的。其次，也必须把分立定态同光谱的频率联结起来。这里就得应用里兹发现的定律，这个定律现在写成如下形式：h 乘以谱线频率等于始态与末终态能量之差。但这定律最好用一个玻尔不肯接受的假设来解释，这就是爱因斯坦关于光量子的概念。玻尔有很长一段时期不愿相信光量子，所以他采取如下的看法：电子在它的绕原子核运动的轨道上由于辐射失去能量，而定态则有如电子作运动时的中间站。其假设是：在辐射过程中，电子在称为分立定态的一些中间站上停止辐射。由于某些未知原因，它在这些中间站上不辐射，而最后一个站就是原子的正常态。当发生辐射时，电子从一个定态走到另一个去。

按照这个图象，处于定态的时间，要比从一个态到另一个态所需的时间长得多。但这两个时间之比当然绝未明确过。

关于辐射本身又怎样呢？我们可以使用麦克斯韦理论的一般概念。从这个观点看来，原子与辐射之间的相互作用似乎是一切困惑的根源。在定态时，不存在这样的相互作用，因此看来可以用经典力学来处理。但能不能应用麦克斯韦的辐射理论呢？我不妨提一句，采取这种观点大概是不必要的。人们本来可以更认真地

采用光量子的观点。本来可以说，我们看到的光的干涉条纹，是由于对光量子运动的一些附加条件而产生的。我隐约记得早年同温采尔(Wentzel)的一次讨论，那次他向我解释过，有可能使光量子的运动量子化，从而得以解释干涉条纹。但不管怎样，这不是玻尔采取的观点。无论从哪里开始，总要碰到一大堆困难，所以我想比较详细地谈一下这些问题。

首先，曾有强大的论据支持定态的力学模型。我已提到过卢瑟福的实验。于是，原子中电子的周期性轨道就很容易同量子条件联系起来。因此，定态的概念可以同电子的特定椭圆轨道的概念联结起来。玻尔在他早期的演讲中，常常展示电子在它们绕原子核的许多轨道上运动的图象。

在好些有趣的场合，用这模型可处理得很完满。首先是在氢光谱中。再有索末菲关于氢光谱线相对论性精细结构的理论，以及所谓斯塔克效应——在电场中谱线的分裂。因之，大量材料似乎表明，量子化轨道同分立定态的这种联系是正确的。

另一方面，也有其他理由反驳说，这样的图象不会是正确的。我记起同斯特恩的一次谈话。他在1913年告诉我，当玻尔的第一篇论文发表后，他曾对一个朋友说，“要是玻尔刚发表的那些谬论是正确的话，我就不想再当物理学家了。”

现在我来指出这个模型的困难和错误。最严重的困难或许是如下所述。电子在这模型中作由量子条件规定的周期运动，因而它要以一定的频率绕原子核运动。然而，这个频率绝不会在观察中出现。我们决不会看到它。我们看到是些不同的频率，每一频率决定于从一个定态到另一定态的跃迁中的能量差。还有关于简并性的一个困难。索末菲引进了磁量子数。按照这种量子条件，当某方向有磁场时，原子绕这个磁场的角动量必须为±1或0。但如在另一方向取一不同磁场，就必须对这个不同的方向进行量子

化。然而，可以先在某一方向有一极其微弱的磁场，而在很短时间之后变为另一方向。磁场是太弱了，不足以使原子转过去。因之同量子条件的矛盾看来无法避免。

正好五十年前我同玻尔的第一次讨论，就是围绕着这些难点之一进行的。玻尔在哥丁根作过的一次讲演中说过，在一恒定电场中，可以按量子条件算出定态的能量，而克拉麦斯(Kramers)关于二次斯塔克效应的最近计算可能给出正确结果，因为在其他场合这个方法很成功。另一方面，恒定电场与缓变电场的区别实在很小。若一电场不是变化得很缓慢，而是以一(比方说)很接近轨道频率的频率在变化，那末，我们知道，谐振当然并不是在外电场频率等于轨道频率时发生，而是当它等于在光谱中观察到的、由跃迁决定的频率时发生。

当我们讨论这问题时，最后玻尔试图解释说，一当电场随时间变化时，辐射力便出现，因而用经典方式把结果算出来大概就不可能了。但同时他当然会看到，在这一点上求助于辐射力是有些不自然的。所以我们很快便倾向于认为，分立定态的力学模型中必定有点什么东西是错误的。还有一篇非常关键性的论文没有提到。那是泡利关于 H_2^+ 离子的一篇论文。泡利想过，如果有一个像氢那样具有周期轨道的明确模型，我们也许能应用玻尔-索末菲量子化规则，但对于一个复杂的模型，比方说氦原子，其中有两个电子绕原子核运动，那就恐怕不能应用了，因为这时我们将碰到三体问题中的一切可怕的数学困难和繁冗。另一方面，若有两个固定中心，两个氢核和一个电子，则电子的运动仍然是很好的周期运动，且可以计算出来。对于其他，这模型已经是太复杂了，所以它可用来作为一种校验，看看旧规则是否真的在这样一种中间状况下适用。泡利把这模型算了出来，发现他的计算果然得不出 H_2^+ 的正确能量。因此对于用经典力学计算分立定态的疑虑增加了，

而注意力越来越转到了定态之间的跃迁。我们已经懂得，为了获得现象的完整解释，只算出能量是不够的，还必须算出跃迁几率。我们从爱因斯坦 1918 年的论文知道，跃迁几率是规定为与始态、终态两个态有关的量。玻尔曾在其对应原理中指出，跃迁几率可以与电子轨道傅里叶展开式的高次谐波的强度联系起来，从而加以估计。想法是：每条谱线对应于电子运动展开式的一个傅里叶分量，由其振幅的平方便可算出强度。当然，这强度不能与爱因斯坦的跃迁几率马上联系起来，但是它与之有关，因此可对爱因斯坦的量作某种估计。循此思路，注意力逐渐从定态的能量转移到定态之间的跃迁几率，而正是克拉麦斯，开始认真研究原子的色散，并将玻尔模型在辐射时的行为与爱因斯坦系数联结了起来。

在写出色散公式时，克拉麦斯的指导思想是，原子中虚谐振子对应于谐波。之后，克拉麦斯同我还讨论了散射光频率与入射光频率不同的散射现象。在这种现象中，散射光量子与入射光量子不同，因为当散射时原子从一个态跃迁到另一个态。这种现象那时刚被喇曼在带光谱中发现。在这些场合要写出色散公式时，就不单要谈到爱因斯坦的跃迁几率，而且也要谈到跃迁振幅，必须给振幅以相位，并且须将两个振幅相乘——比方说，从态 m 到态 n 的振幅乘上从态 n 到态 k 的振幅等等，然后对中间态 n 求和。只有做了这些以后，才得出色散的合理公式。

这样，我们看到，不把注意力集中到定态的能量而是集中到跃迁几率和色散以后，结果得出一条探索事物的新途径。事实上，如我适才所说，克拉麦斯和我写入我们的色散论文中的这些乘积之和，差不多已经就是矩阵之积。从那里只要再走很小一步就可以说，好吧，让我们抛弃电子轨道的整个想法，让我们简单地用相应的矩阵元来代替电子轨道的傅里叶分量吧。我必须承认，在那时我还不知道矩阵为何物，不知道矩阵乘法规则。但我们可以从物

理中学到这些运算，尔后发现那正是数学家所熟知的矩阵乘法。

这时我们可看到，与分立定态联系着的电子轨道的概念，实际上已被抛弃了。然而分立定态的概念仍保存着。这概念是必要的，它在观测中有其根据。但电子轨道不能同观测联系起来。所以它被抛弃了，留下的是这些坐标的矩阵。

似乎应当提一下，在 1925 年发生这些之前，玻恩于 1924 年在哥丁根讨论班上已强调指出，把量子论的困难单单归诸辐射与力学体系间的相互作用，是不正确的。他宣传了这种想法：力学必须加以改造，必须用某种量子力学来代替，方能提供理解原子现象的基础。之后，矩阵乘法也规定了。玻恩与约尔当，和狄拉克独立地发现，在我第一篇论文中加于矩阵乘法的那些附带条件，实际上可写成 $pq-qp=h/2\pi i$ 这样精致的形式。这样一来，他们便能为量子力学建立起一个简单的数学方程。

但即便到这时候，谁也说不出分立定态究竟是什么，所以现在来谈谈我这个报告的第二部分——态的概念。在 1925 年，确实已有了计算原子分立能量值的方法。并且至少在原则上，也已有了计算跃迁几率的方法。但原子的态是什么呢？怎样才能描述它呢？它不能根据电子轨道来描述。直到此时，态只能用能量和跃迁几率来描述，但原子的图象却一点也没有。何况也很显然，有时还有非定态。最简单的非定态的例子，是穿过云室的电子。因此问题实质上是，怎样处理这种可在自然界中出现的态。穿过云室的电子的径迹这样的现象，能不能用矩阵力学的抽象语言来描述呢？

幸而，那时薛定谔已经发展了波动力学。在波动力学中，事物看起来很不相同。在那里，对分立定态可以定义一个波函数。有一段时候薛定谔想过，分立定态可发展成如下图象：一个三维驻波，它可以写成一个空间函数与一时间周期函数 $e^{i\omega t}$ 的乘积，这个波

函数绝对值的平方意味着电子密度。这种驻波的频率则使之等同于光谱定律中的项。这是薛定谔概念中决定性的崭新之点。那些项并不一定意味着能量，却是意味着频率。因此薛定谔走到了分立定态的一个新的"经典"图象，起初他相信，真的可以把这个图象应用于原子理论的。但没多久便看出，那也还是不行。1926年夏，在哥本哈根曾有十分激烈的争论。薛定谔认为，物质按波函数环绕原子核连续分布的原子波动图象，可以代替量子论的旧模型。但是与玻尔讨论导致的结论却是，这种图象甚至不能解释普朗克定律。对这种诠释，十分重要的是应当说，薛定谔方程的本征值不仅代表着频率，——它们实际上是能量。

这样一来，当然就回到了从一个定态到另一定态的量子跳跃的概念，薛定谔对于我们讨论的这种结果十分失望。但即便我们知道了这一点，接受了量子跳跃，我们也并不知道"态"这个词能意味着什么。当然，我们可以试试看，能否用薛定谔方程去描述穿过云室的电子。很快作了这种尝试，结果表明那是不行的。在初始位置时，电子可用波包来表示。波包要向前运动，于是我们获得了有些象穿过云室的电子径迹的东西。但困难的是，波包要越变越大，以致如果电子的行程足够长的话，它就会有一厘米或甚至更大的直径。这肯定不是在实验中观察到的现象，所以这种图象仍然必须抛弃。在这种情况下，当然我们作了许多讨论，而且是很困难的讨论，因为我们都感到，量子力学或波动力学的数学程式已是最终的了。它无法再改变，我们不得不按这个程式进行一切计算。另一方面，却没人知道在这程式中，怎样去表示象穿过云室的电子径迹这样简单的事例。玻恩迈出的第一步是：从薛定谔理论算出碰撞过程的几率；他引进了一个概念：波函数的平方并不是薛定谔所认为的电荷密度，而是代表在某给定地点找到电子的几率。

之后狄拉克和约尔当的变换理论也出来了。在这理论中，可

以从 $\psi(q)$ 变换到(比如说) $\psi(p)$，而且很自然地可以认为，平方值 $|\psi(p)|^2$ 应当是找到动量为 p 的电子的几率。因此我们逐渐获得这样的概念：波函数的平方意味着某种几率，顺便提一下，这并非三维空间中的波函数，而是在位形空间中的波函数。有了这种认识以后，我们再回到云室中的电子。会不会是我们问了错误的问题？我记得，爱因斯坦告诉过我："正是理论决定什么是可以观测的。"那意味着，如果认真一点讲，我们不应当问："我们怎样才能表示云室中电子的径迹？"而应当问："在自然界中，是否真的只有那些能用量子力学或波动力学表示的情况才会出现？"

围绕这个问题，我们立刻看到，云室中电子的径迹并不是具有明确位置和速度的一条无限细的线，实际上云室中的径迹是一系列点，这些点是由水滴不太精确地确定的，而速度也同样不能太精确地确定的。因此我简单地提这个问题："如果从'只有能用量子力学的数学程式表示的那些情况，才能在自然界中找到'这样的基本原则出发，那么，当我们想知道一个波包的速度同时又想知道它的位置时，所能获得的最佳准确度是怎样的呢？"这是一个简单的数学问题，其结果便是测不准原理，它看来与实验情况相符。我们终于知道了怎样表示电子径迹这类现象，但又一次付出了很高的代价。就是说，这个解释意味着，表示电子的波包在每个观察点都在变化，也就是在云室中的每个水滴处都在变化。在每一点上，我们获得关于电子态的新信息，所以必须把原来的波包代以一个新波包，以表示这种新的信息。

这样表示的电子态，不允许我们赋与轨道中的电子以确定的性质，如坐标、动量等等。我们所能做的，仅仅是谈到几率：在适当的实验条件下，于某点找到电子的几率，或找到电子速度为某一值的几率。因此，最后我们得到的态的定义，比原来的电子轨道抽象得多。数学上，我们用希耳伯特空间中的一个矢量来描述它，并且

这个矢量决定了在这个态时进行的各种实验的结果的几率。每一个新的信息，都会使态改变。

态的这个定义，对自然现象的描述作了一个巨大变革，或者如狄拉克所说是一个巨大的跳跃；并且我怀疑，爱因斯坦、普朗克、冯·劳埃和薛定谔的不愿接受它，是否可以单纯归结为偏见。偏见这个字眼在这里是太消极了，并没有概括所有情况。当然那也是真实的，例如爱因斯坦就以为，必然能够在旧物理学同样的意义上，对原子态这种事情给出一种客观描述。放弃这种观念的确非常难，因为我们的所有语言都同客观性的概念紧紧地连结在一起。所以在物理学中用来描述实验的字眼，例如测量、位置、能量、温度等等，都是以经典物理和它的客观性概念为根据的。宣称在原子世界中这种客观描述成为不可能，而只能用希耳伯特空间中的一个方向来规定一个态，这样的讲法实在是太革命性了；我想那时的许多物理学家干脆不愿接受它是并不奇怪的。

1954 年，爱因斯坦死前几个月，他同我讨论了一下这问题。那是我同爱因斯坦渡过的一个愉快的下午，但一当谈到量子力学的诠释时，仍然是他不能说服我，我也不能说服他。他总是说："是的，我承认，凡是能用量子力学算出结果的实验，是如你所说的那样出现的，然而这样的方案不可能是自然的最终描述。"

现在来谈我要讨论的第三个概念：基本粒子的概念。1928 年以前，每个物理学家都知道，基本粒子意思指的是什么。电子和质子是最明白的例子，那时我们喜欢简单地把它们当作点电荷：体积无限小，仅由它们的电荷与质量所确定。我们不得不勉强地承认，它们必须有一半径，因为它们的电磁质量应当是有限的。这类对象应有半径之类的性质这样的想法，我们是不喜欢的；但至少它们看来似乎像球一样完全对称，所以我们还算高兴。然而以后发现了电子自旋，使这个图象大大改变了。电子并不对称。它有一

根轴，并且这结果突出地指出，恐怕这种粒子具有更多的性质，它们并不是简单的，不像我们原先所想的那样基本。1928年狄拉克发展了电子的相对论理论并发现了正电子，情况又完全改变了。一个新观念不可能在一开始时就十分清楚的。狄拉克起初想，他理论中的负能量空穴可以等同于质子；但后来很明显，它们应当具有与电子相同的质量，最后在实验中发现了它们，并称之为正电子。我觉得这个反物质的发现恐怕是本世纪物理学中所有巨大跃进中的最大的跃进。这是一个无比重要的发现，因为它把我们关于物质的整个图景改变了。在我这次谈话的最后部分里，我想对此作较详尽的说明。

开始狄拉克提出：这种粒子可能在成对产生过程中产生出来。一个光量子，能把真空中的一个虚电子从一些负能态中的一个提到较高的正能量，这就意味着，光量子产生了一对电子和正电子。但这立刻意味着，粒子数不再是个好量子数了，没有关于粒子数的守恒律了。例如，按照狄拉克的新观念，我们可以说氢原子不一定要由质子和电子构成。它也可暂时由一个质子，两个电子，一个正电子构成。实际上，在考虑到量子电动力学的更精细的细节时，这些可能性确实起一些作用。

在辐射与电子相互作用的场合中，成对产生这种现象是会出现的。但这样就可很自然地假设，类似过程可能在远为广泛的物理领域中出现。1932年时我们已知道，原子核里没有电子，原子核是由质子和中子构成的。但后来泡利提出：β衰变也许可以这样来描述，就是说一个电子与一个中微子在β衰变中产生了出来。后来费米在他的β衰变理论中表述了这种可能性。由此可见，早在那时候粒子数守恒律就已完全被抛弃了。我们知道，在有些过程中，粒子是从能量产生出来的。当然，这种过程的可能性，在狭义相对论中已经给出：能量在转化为物质，但它的实在性却是联系

到狄拉克关于反物质和成对产生的发现而首次出现的。

β 衰变的理论，是费米在 1934 年发表的。不多几年后，连系着宇宙辐射我们提出一个问题："如果两个基本粒子以很高能量相碰，将发生什么？"自然的回答是，没有什么良好理由可以认为，在这样的过程中不应当产生许多粒子。所以，实际上，在狄拉克的发现之后，高能碰撞中粒子多重产生的假设是十分自然的。十五年后，当人们研究极高能量的现象并能够在大加速器中观察到这些过程时，才对这个假设作了实验验证。但是，如果我们知道，在极高能量的碰撞中，任何数目的粒子都可能产生，唯一条件是初始的对称性与最终的对称性相同，那么我们还得假定，任何粒子实际上是一个复杂的复合体系，因为在某种程度的真实性上我们可以说，任何粒子实际上是由任何数目的其它粒子所构成。当然，我们还得承认，把一个 π 介子看作仅由核子和反核子所构成大概是合理的近似，我们无须考虑更高级的结构了。但那只是个近似，如果我们一定要讲得严谨的话，那么我们应当说，对任一 π 介子，我们有几个粒子甚至任意多个粒子的多种组态，只要总的对称性与 π 介子的对称性一样就行了。所以狄拉克的发现的最惊人结果之一是：基本粒子的旧概念完全崩溃了。基本粒子不再是基本的了。它实际上是一个复合体系，说得更确切些是个复杂的多体体系，它所具有的复杂性完全不下于分子或任何其他这类物体真正具有的复杂性。

狄拉克理论还有另一个重要结果。在旧理论中，我们说的是在非相对论性量子论中，基态是一个极简单的态。它就是真空，空的世界，没有任何别的东西，所以它有最高可能的对称性。狄拉克理论中的基态就不同了。它是一个充满着看不到的负能粒子的客体。除此以外，如果引入了正反粒子对产生的过程，我们就可以预期，基态必须包含几乎无穷多个虚正电子、电子对或虚粒子反粒子

对；因此马上可以看出，基态是个复杂的动力学体系。它是基本自然定律所确定的本征解之一。如果基态按这种方式解释，我们可以进一步看到，在基本自然定律群中，它不需要是对称的。事实上，电动力学最自然的解释看来是：在同位旋群里，基本自然定律是完全不变的，而基态却不然。因而在同位旋空间里的旋转中基态是简并的假设，按照哥耳德斯通的一个定理，要求远程力或静止质量为0的粒子的存在。库伦相互作用和光子或许也应当以这种方式来解释。

最后，狄拉克根据他的空穴理论在1941年的贝克讲座里阐述了一种思想：在相互作用的相对论场理论中，应当使用不定度规的希耳伯特空间。究竟通常的量子理论的这种推广是否真正必要，这仍是个有争执的问题。但在近数十年内经过许多讨论后，我们已不能怀疑，不定度规的理论确可以前后一贯地建立起来，并可导致合理的物理诠释。

所以在这一点上最后的结果看来是，狄拉克的电子理论改变了原子物理的全部面貌。放弃了基本粒子的旧概念以后，曾经被称为基本粒子的那些客体现在必须看成是复杂的复合体系，总有一天可从基本自然定律把它们计算出来，正如复杂分子的定态可以从量子力学或波动力学计算出来一样。我们已经知道，当取基本粒子的形式时，能量变成物质。那些叫做基本粒子的态，与原子分子的态一样复杂。或者把这似非实是地表述为：每个粒子由其他一切粒子构成。所以我们不能期望，基本粒子物理学会比量子化学简单。这是一个重要之点，因为即便现在，还有很多物理学家盼望有那么一天，我们会发现一种非常简单的方法去描述基本粒子物理，好像当年的氢光谱那样。这个我想是不可能的。

在结论中，关于什么叫做"偏见"我想再说几句。可以说，我们相信有基本粒子是一种偏见。但我又觉得那将是太消极的说法。

因为在近二百年内，我们在原子物理中使用的语言，都是直接间接地以基本粒子的概念为基础的。我们经常问："这物体由什么构成？较小粒子在较大物体中的几何或力学组态怎样？"实际上我们总是回到了德谟克利特的哲学；但我想现在我们已从狄拉克那里懂得了：这是个错误的问题。要避开已成为我们语言一部分的那些问题，仍是很困难的。所以很自然地，即便现在，许多实验物理学家，甚至还有一些理论物理学家，仍在寻找眞正的基本粒子。例如，他们希望夸克能够担任这种角色，假如它存在的话。

我想这是个错误。其所以错误，因为即使夸克存在，也不能说质子是由三个夸克构成。我们必须说，它可能暂时由三个夸克构成，也可能由四个夸克一个反夸克，或五个夸克两个反夸克构成，等等。而所有这些组态都应包含在质子中；而一个夸克又可以由两个夸克一个反夸克所组成如此等等。因此我们无法回避这种基本的状况；但既然我们仍有从旧观念来的问题，避开它们是极端困难的。许许多多的物理学家在寻找夸克，并且将来大概还要找下去。以往十年内，有很强的偏见偏爱夸克，我以为假如它们真存在的话，应当已被发现了。但这是一件要由实验物理学家来决定的事。

还留有这样一个问题：应当用什么去代替基本粒子的概念呢？我想我们应当用基本对称性的概念来代替这个概念。基本对称性规定了决定基本粒子谱的基础定律。现在我不预备详细讨论这些对称性。仔细分析了观察的结果以后，我想作出论断：除洛伦兹群外，还有SU_2，标度定律，以及分立变换 P，C，T，都是真正的对称性。但我不想把SU_3或这类高阶对称包括到基本对称性里去，它们可由体系动力学产生而作为近似对称性。

但这又是一件要由实验决定的事。我只想说，我们必须寻找的不是基本粒子，而是基本对称性。当我们确实作出了这个决定

性的概念变化(这是由狄拉克发现反物质而来的)以后，我认为就不需要什么进一步的突破去理解基本(毋宁说是非基本)粒子了。我们只须学会用基本对称性这个新的、不幸是很抽象的概念去进行工作;但这可能是够糟糕的了。

〔侯德彭译自《美国物理学期刊》(American Journal of Physics)1975年5月号〕

基本粒子是什么？

"基本粒子是什么？"这个问题当然必须首先由实验来回答，而且必定要涉及哲学思考。因此，我首先要对近五十年来的基本粒子物理学的最重要的实验成果作一简要的综合评述，并试图说明：如果人们无成见地考察这些实验，那末这些成果已经在相当大的程度上回答了上述问题，从而理论家也没有什么更多的话可补充的了。然后，我在第二部分将补充探讨与基本粒子概念相联系的哲学问题。因为，我认为，基本粒子理论的某些错误的发展——而我就怕确有这样的错误发展——是由于理论的创立者固执地对哲学漠不关心，可是他们实际上不自觉地从坏的哲学出发从而由于成见提出了不合理的问题。人们或许可以稍为有点夸张地说，好的物理学不自觉地被坏哲学腐蚀了。最后我将讨论这些成问题的发展，它们可以和我亲身经历过的量子力学的历史中的错误发展相对比，我还将提出人们怎样才能避免这样的错误的一些建议。因此，这个报告的结论应该还是比较乐观的。

最重要的实验结果和它们的理论解释

我首先谈谈实验事实。差不多在五十年前，狄拉克在他的电子论中预言，除电子之外，必定还有它的反粒子——正电子；不多几年之后，安德森和布莱凯特(Blackett)用实验证明了正电子的存在(它在电子偶的产生过程中出现)以及所谓反物质的存在。这是头等重要的发现。因为在这以前，人们一般设想有两类基本粒子：电子和质子，它们与一切其他粒子的不同之点是，它们是决不能改变的，因此它们的数目也总是守恒的。正因为如此，人们称它们为

基本粒子。一切物质被认为最终都应该由电子和质子组成。电子偶的产生和正电子的实验证明表明，这种设想是错误的。电子既可以产生，也可以湮灭；因此它们的数目决不守恒；它们不是原来意义上的基本粒子。

第二个重要步骤是F. 约里奥和I. 居里发现人工放射性①。人们从许多试验知道，一个原子核可以通过发射粒子转变为别的原子核，只要能量、角动量、电荷等守恒定律允许这种转变。能量转化为质量，这在爱因斯坦的相对论中早已被认为是可能的，现在就成了经常观测到的现象了。这样也就谈不到什么粒子数的守恒了。可是还有一些可用量子数表征的物理性质——例如角动量或电荷，它们的量子数可以取正值或负值，而且守恒定律对于它们是有效的。

在三十年代，还有另一个重要的实验发现。人们证实了，在宇宙辐射中有能量很高的粒子，这些粒子和其他粒子碰撞时，例如和照相底片乳胶中的一个原子核②相碰撞时，可以发射出有许多次级粒子的簇射。有一个时期，许多物理学家认为，这种簇射只能由原子核中的一种级联反应而形成；可是后来弄清楚了，实际上仅仅两个高能粒子碰撞也有理论上所预测的许多次级粒子产生。在四十年代末，鲍威耳发现了在这些簇射③中起主要作用的 π 介子。从而表明，在能量很高的粒子的碰撞中能量转化为物质是十分普遍的决定性过程，因此说什么“初始粒子的分裂”显然已没有什么意义了。“分裂”这个概念在实验上已经失去了意义。

---

① 原文误为费米发现人工放射性。在美国《今日物理学》(*Physics Today*) 1976年3月号刊载的题为《基本粒子的本性》的英译文中，改为“F. 约里奥和I. 居里发现人工放射性。”这里采纳了英译文中的改正。——译者注

② “原子核”原文误为“质子”，此处参照英译文《基本粒子的本性》作了改正。——译者注

③ 英译文把“簇射”改为“粒子的多重产生”。——译者注

在五十年代和六十年代的实验中，这种新的情况一再被证实；发现了许多长寿命的和短寿命的新粒子，而对于这些粒子由什么组成的问题，不再能作出明确的回答，因为这个问题没有理性的意义。比如说，一个质子可以由中子和π介子或者由Λ超子和K介子或者由两个核子和一个反核子合成；或者可以简单地说，一个质子由连续物质所组成；而所有这些陈述都是同样正确或者同样错误。基本粒子和复合粒子的区分从此根本消失了。这或许是近五十年来最重要的实验结果。

由于这种发展，实验迫使人们作这样一种类比：基本粒子多少类似于一个原子或一个分子的定态。有一整套粒子谱，就象铁原子或分子有一套定态谱一样，在最后一个例子中，我们既可以设想为一个分子的不同定态，也可以设想为化学中许多不同的分子。对于粒子我们可以说"物质"谱。实际上，六十年代和七十年代用大加速器所做的实验证明了这种类比符合迄今为止的一切经验。就象原子的定态一样，粒子也可以用量子数来表征，也就是用对称性和变换性来表征，结合这些量子数的精确的或者近似有效的守恒定律决定了转变的可能性。就象一个受激氢原子的空间转动状态决定了它的变换特性，决定了它是否能够通过发射一个光量子跃迁到一个较低的态一样，也可以提出这样的问题：一个φ玻色子能否发出一个π介子衰变为一个ρ玻色子，是不是也是由这样的对称性决定的？就象处于不同定态的同种原子有很不相同的寿命一样，粒子也有很不相同的寿命。一个原子的基态是稳定的，它有无限长的寿命，而电子、质子、氘核等粒子也具有同样的特性。可是这些稳定粒子决不比不稳定粒子更为"基本"。氢原子的基态可由薛定谔方程导出，而氢原子的激发态也由同一个薛定谔方程导出。同样，电子和光量子① 也决不比一个Λ超子更基本。

① 在题为《基本粒子的本性》的英译文中，光量子改为质子。——译者注

因此，近年来的实验粒子物理学在其发展过程中履行着类似于二十年代初光谱学所履行的任务。就象当时出现了把所有原子的电子壳层的定态收集在内的大表册〔所谓的帕邢图（Paschen-Götze)〕中一样，现在也有每年一次的全面的关于粒子性质的概览(Reviews of Particle Properties)，其中记载了物质的定态和它们的变换特性。这种编制这样内容丰富的表册的工作，同天文学家的天文观测概览相仿，很自然，每一个观测者希望有时能在他的领域内找到特别有趣味的对象。

但是，在原子的电子壳层物理学和粒子物理学间也有特征性的区别。在原子壳层中，人们所接触的能量是如此之低，以致相对论的特征可以忽略不计；因此人们可以利用非相对论性量子力学来表述。这意味着，以原子壳层物理学为一方，以粒子物理学为另一方，它们的有关对称群是不同的。原子壳层物理学中的伽利略群在粒子物理学中由洛伦兹群来替换；同时，在粒子物理学中加入了象同位旋群这样的新群，它和SU_2群是同构的，然后加入了SU_3群、标度群以及其他等等。确定粒子物理学中的有关群是一项重要的实验任务，而这在过去的二十年中已经在很大程度上解决了。

从原子壳层物理学我们可以了解到，在明显地只描述近似有效的对称性的那些群中，我们可以区分两种根本不同类型的群。例如我们想到光谱中的空间转动的O_3群和与光谱中的多重结构有关的$O_3 \times O_3$群。量子力学方程对于空间转动群是严格不变的，因此具有较高角动量的原子的态是严格地简并的，也就是说，有几个态具有严格相同的能量。只有当原子处于外部电磁场中时，这些态才分裂开，而象塞曼效应或斯塔克效应这些众所周知的精细结构才显示出来。如果系统的基态象一个晶体或一个铁磁体的基态那样对于转动不是不变的，那末这种简并性也可以被破坏。在这种情况下，能级的分裂也会出现；一个铁磁体中的一个电子的两个自

旋方向不再严格属于同一能量。此外，按照哥耳德斯通(Goldstone)的著名理论，其能量随着波长的增长而趋近于零的玻色子也是存在的，在铁磁体的场合，布洛赫的自旋波和磁振子代替了哥耳德斯通波。

对于 $O_3 \times O_3$ 群，情况就完全不同了，从这种群产生了光谱的众所周知的多重线。这里涉及到的是近似的对称性，只要在某个范围自旋和轨道相互作用很小，只要人们可以因此把电子的自旋和轨道互不相关地旋转，而不会使相互作用改变多少，这种对称性就实现了。因此这种 $O_3 \times O_3$ 对称性来自系统的动力学，从而它也只是在光谱的某一部分才适用的近似对称性。在经验上，我们可以用这样的办法来最明确地区分两种破缺了的对称性：对于基态的破缺的基本对称性，必定存在这些按照哥耳德斯通理论其静止质量为零或属于远程力的玻色子。如果人们找到了它们，那末就有理由认为，基态的简并在这里起重要作用。

如果我们把这个原子壳层物理学的经验应用到粒子物理学方面，那末根据实验它们十分接近，洛伦兹群和 SU_2 群即同位旋群被解释为作为自然定律基础的基本对称性。然后电磁力和引力作为与基态的破缺的对称性相联系的远程力而出现。更高的群 SU_3，SU_4，SU_6 或 $SU_2 \times SU_2$，$SU_3 \times SU_3$ 等等这时应当被当作为动力学的对称性，就象原子壳层物理学中的 $O_3 \times O_3$ 群一样。至于伸缩群或标度群，我们可以怀疑，是否应当把它们算在基本对称性之内；它们会由于有限质量的粒子的存在和与宇宙中的大物体有关的引力而被破坏。由于它们和洛伦兹群的密切关系，人们也许应该把它们列入基本对称性。刚才描述的把破缺的对称性同两种基本类型相等同，如我已经说过的那样，是通过实验结果而逐渐接近的，但是我们也许还不能说最终确定了这些对称性的类型。最重要的是，对于用以分析谱系现象的对称群，我们必须提出(如果可能)也

必须回答这样的问题：它们究竟属于两种基本类型中的哪一个。

还需要指出原子壳层物理学的一个特征：在光谱中有一些不能组合或者正确地说只是微弱地组合的谱项系，就象仲氦和正氦光谱那样。在粒子物理学中，人们也许可以把费米子谱分为重子和轻子的这种划分同这种特征相比较。

因此，原子和分子的定态同基本粒子物理学中的粒子间的类比是近乎完备的，从而在我看来，把我在开始时提出的"基本粒子是什么？"这个问题定性而又完全地回答了。但只是定性地回答！于是对理论家提出了进一步的问题：是否这种定性的关系也能够以定量的计算作为基础？为此首先必须回答一个初步的问题：定量地理解一个谱系究竟是什么意思？

为此目的，不仅在经典物理学中而且在量子力学中都有一系列例子。我们可以设想一个钢片的弹性振动的频谱。如果人们不满足于定性的理解，那末我们必须从钢片的弹性出发，这种弹性应当用数学加以表述。在这一点做到之后，人们还必须加上边界条件，比如说钢片是圆的或是方的，它是被绷紧了还是没有绷紧，由此人们至少可以在原则上算出弹性或声学振动的频谱系。诚然，由于问题的复杂程度，确实不能严格算出一切振动频率，但是总能够算出那些具有最少的波节数的最低的振动频率。

因此，为了做到定量的理解，有两个要点是必不可少的：关于钢片的动力学关系的严格数学表述的知识和边界条件，后者人们可以看作是"偶然的"，也就是说是由附近的环境来确定的；人们也可以把钢片切割成别的形状。空腔共振器的电动力学振荡的情况与此相仿。麦克斯韦方程确定了动力学行为，空腔的形状规定了边界条件。铁原子光谱的情况也相类似。一个原子核和26个电子的系统的薛定谔方程确定了动力学行为，至于这个例子中的边界条件，它表明在无穷远的波函数应当为零。如果原子封闭在一

个小箱中，光谱就会有一些变化。

如果我们把这些知识转用到粒子物理学上，那末首要的问题就是用实验方法求得成体系的物的动力学性质，并把它们用数学表述出来。然后必须加上作为偶然因素的边界条件，在这里这些条件包含的内容主要是关于所谓空虚空间的陈述，也就是关于宇宙和它的对称性的陈述。无论如何，第一步必须是试图用数学来表述自然定律，它确定了物质的动力学。第二步，人们必须作出关于边界条件的陈述。因为没有这些边界条件就完全不能确定谱系。例如，我可以揣测，在今天天体物理学的"黑洞"中，基本粒子谱将完全不同于我们所看到的。遗憾的是，我们对此不能进行实验。

可是，我现在还要就决定性的第一步，也就是动力学定律的表述问题，补充一句话。有一些粒子物理学的悲观主义者，他们认为，这样的确定物质的动力学性质的自然定律根本不存在。坦白地说，我完全不能从这样的观点出发。因为，无论如何，还是必需有物质的动力学，否则就不会有谱系；并且人们还应该能用数学描述它。悲观主义者的观点意味着，整个粒子物理学归根结蒂只不过是记载物质的尽可能多的定态、跃迁几率等资料的巨大的表册，即粒子性质的超级概览（Super-Review of Particle Properties），因此是其中没有东西可以进一步理解因而也很少有人阅读的这样一本表册。但是，这种悲观主义没有一点儿理由，这方面我可以提出很多的证明。因为人们已观测到具有锐线的粒子谱，因而也就是间接地观测到了严格确定的物质的动力学。我在前面简要描述的实验结果也已包含了关于基本的自然定律的基本不变性的很确定的提示，并且关于这些定律所包含的因果性的程度，我们从色散关系已经知道了不少。因此，自然定律的主要的确定部分已在我们手中，因为在我们终于在某种程度上对物理学中那么多别的谱系

达到了定量的理解之后，尽管粒子谱有高度复杂性，它在这方面也应当能够被理解。我不想在这里讨论(由于它的复杂性)很久以前我和泡利提出的关于基本自然定律的数学表述的具体建议，关于这个建议我至今仍认为，它有最大的可能是正确的。但是我想特别强调指出，这样一个自然定律的数学表述有一个不可改变的前提，这就是人们对基本粒子谱系的(定量的)理解。其他一切都谈不上是理解，只不过是翻阅表册，可是我们作为理论家至少不应该满足于这种情况。

哲学问题

现在我要开始讨论哲学了。哲学，不管自觉不自觉，总是支配着基本粒子物理学的发展方向。二千五百年以来，哲学家和自然科学家一直在讨论这个问题：如果人们试图把物质一次又一次地不断分割下去，将出现什么情况？什么是物质的最小成分？不同的哲学家对这个问题作出了很不同的回答。所有这些回答都对自然科学的历史产生了影响。最著名的回答是哲学家德谟克利特的回答。在一次又一次不断地把物质分割下去的尝试中，人们最终会遇到不可分的、不变的对象，即原子，而一切物质都是由原子组成的。原子的位置和运动决定了物质的性质。对于亚里士多德和他的中世纪的继承者，最小粒子的概念表达得不那么明确。在他们看来，每一种物质确有最小的粒子，进一步分割下去就不再显示该物质特有的特性了。但是，这些最小的粒子同物质一样是可以连续地改变的。因此，在数学上物质是可以任意分割的，物质被想象为连续的。

对德谟克利特采取明确的反对态度的是柏拉图。按照柏拉图的意见，在把物质一次又一次地分割下去的尝试中，人们最终遇到的将是数学形式：立体几何学的正多面体，它们可以由它们的对称

性来确定，而人们可以用三角形来合成它们。这些形状本身不是物质，但是它们构成物质。比如说，元素土就以立方体的形状为基础，元素火以四面体为基础。所有这些哲学家有一点是共同的，他们不管怎样都想解决无限小的二难推论，众所周知，康德对这个问题作了详尽的讨论。

当然，过去有过现在也有要把这个二难推论合理化的朴素的尝试。就象有些生物学家提出了这样的观念，在苹果的种子中包含了不可见的小苹果树，这棵树上也开花结果，在这个果子中又藏着种子，在这个种子中又藏着一颗更小的苹果树，如此等等，以至无穷。有趣的是，在玻尔-卢瑟福把原子当作小行星系的理论的早期，我们同样发展了这种论题：在这个小行星系的行星——电子上，也住着很小的生物，它们造房子，耕作土地，研究原子物理学，而在它们的论文中又把它们的原子看作是小行星系，如此等等，以至无穷。如我们已经说过的那样，这里在暗中总是隐藏着康德的二难推论：一方面很难设想物质总是可以一次又一次地分割下去，但是另一方面也很难设想，这种分割必然有朝一日到一个终点。而我们今天知道，这个二难推论最终是来源于，我们错误地认为我们的直观也能够应用到很小很小的环境中去。在上一世纪，给予物理学和化学以最强的影响的无疑是德谟克利特的原子论。这种观点允许对微小尺度的化学过程作直观的描述。原子可以同牛顿力学的质点相比较，并且这样的类比导致一个令人满意的热的统计理论。实际上，化学家的原子还不是质点，而是小的行星系，而原子核又是由质子和中子复合而成的。可是人们曾这样认为，电子、质子可能还有中子，仍然可看作是真正的原子，也就是物质的最后的不可分割的构成单元。因此，德谟克利特的原子观念成了上世纪物理学家的唯物主义世界观的不可缺少的组成部分。这种原子观念容易理解而且比较直观，它决定了物理学家的思想方法，甚至决

定了那些不愿与哲学打交道的物理学家的思想方法。在这里我可以论证我的主题，今天在基本粒子物理学中，好的物理学不自觉地被坏的哲学腐蚀了。

我们不可避免地在使用一种渊源于这种传统哲学的语言。我们问：质子由什么东西组成？人们能够分割电子吗？抑或它是不可分的？光量子是简单的还是复合的？如此等等。但是，所有这些问题的提法都是错误的，因为"分割"或"组成"等词已在很大程度上失去了它们的意义。因此我们的任务，是要使我们的语言和我们的思想，也就是说，还有我们的自然科学哲学，适应这种由实验所造成的新形势。但是遗憾的是，这很困难。所以错误的问题和错误的观念总是一再潜入粒子物理学中并导致错误的发展，我马上就要讲到这一点。可是在这以前，我还要对直观性作一点评述。

有这样的哲学家，他们主张直观性是一切真正理解的前提。例如，慕尼黑的哲学家丁格勒(Dingler)针对相对论就表示了这样的观点，他认为直观的欧几里得几何学是唯一真正的几何学，因为我们在建造我们的量度仪器时是以它的正确性为前提的；关于后一点，丁格勒当然是对的。因此，他这样说，人们不能用背离欧几里得几何的一般黎曼几何来描述作为广义相对论基础的实验经验；因为，否则人们就要陷入矛盾。但是这种要求显然是过分了。为了证明我们用实验做的那些事是正确的，只要知道在我们的仪器的尺度内欧几里得几何是足够好地近似正确就行了。因此我们必须容忍这样的事情，就是在十分小和十分大的尺度内的实验经验不再提供我们直观的图象。然后我们才能理解前面说过的无限小的二难推论在基本粒子物理学中已以一种非常微妙的方式解决了，这是一种既非康德也不是古代哲学家所能想到的方式：这就是说，"分割"一词失去了它的意义。

如果人们一定要把今天粒子物理学的认识同任何以往的哲学

相类比的话，那末只有柏拉图的哲学才能相比；因为现代物理学中的粒子是对称群的表示（量子论就是这样说的），在这方面它类似于柏拉图学说中的对称体。

基本粒子物理学中成问题的问题提法

但是我在这里并不是要讨论哲学，而是要讨论物理学，因此我现在要谈谈在我看来是从错误的问题提法出发的那些理论基本粒子物理学的发展。首先就是这样的命题：象质子、π介子、超子以及许多其他粒子那样的已被观测到的粒子，是由更小的、未被观测到的粒子——夸克，或者还有部分子、胶子，粲粒子以及一切不管叫什么的这类假想粒子——所组成。显然，这里提出了这样一个问题：质子是由什么组成的？但是提问者忘了，“组成”一词只有当粒子能以比它的静止质量小得多的能量消耗分裂为它的组成部分时才多少有一点意义，否则“组成”一词就丧失了它的意义。对于质子也是这种状况。为了说明一个好象是明确定义了的词会失去它的意义，我不得不重述玻尔在这种场合乐于引用的一个故事。一个小孩跑到一家店铺中，手中拿着两个芬尼①跟店员说，我要买两芬尼的杂拌糖。店员给他两块糖并对他说，你自己可以把它们杂拌起来。对于质子，“组成”这一概念同这个小孩的故事中的“杂拌”的概念具有同样的意义。

对此会有许多反对的意见：夸克假说也是从实验经验中得来的，也就是说，从SU_3群的经验关系的证实中得来的，甚至超出SU_3群的适用范围它也能成功地解释许多实验。这确不能否认。但我可以根据我亲身经历的量子力学的历史提出一个反证，这个反证可以明显地揭示出这种论证的弱点。在玻尔的理论提出之前，有许多物理学家主张，一个原子必定由一些谐振子所组成。因为光

① 芬尼是德国的辅币，等于百分之一个马克。——译者注

谱中包含了只能由谐振子发射出来的锐线。而这些振子的电荷必须对应于不同于电子电荷的 e/m 值，此外，因为在光谱中有许许多多谱线，就必须假设有许许多多振子。

尽管有这些困难，沃耳德玛·福格特(Woldemar Voigt) 1912 年在哥丁根以下列方式建立了一个关于钠光谱D 线的反常塞曼效应的理论：他假定有两个耦合的振子，它们在没有外部磁场的情况下发射出两条 D 线。他把振子的相互耦合以及它们和外场的耦合作了这样的安排：在弱磁场的情况下真正出现反常塞曼效应，而在很强的磁场下也可以正确描述帕邢-伯克效应。对于中等场的中间范围，由很长和复杂的平方根给出频率和强度，虽然是非常繁杂的公式，可是显然很好地符合实验结果。十五年后，约尔丹和我根据量子力学的微扰理论费力地计算了同一问题。引起我们很大惊讶的是，我们得到的正好是福格特的关于频率以及强度的老公式，而且也包括关于中间场的复杂部分。其理由，如我们后来所了解的，纯粹是由于形式上的数学方法的缘故。量子力学微扰理论导致一个耦合线性方程组，方程组的本征值确定了频率。一个耦合谐振子系统在经典理论中同样导致这样一个耦合线性方程组。因为在福格特理论中人们已校正了最重要的参数，所以，用不着奇怪会得到正确的结果。但是，福格特理论没有对理解原子结构作出贡献。

为什么福格特的尝试在一方面如此成功，在另一方面又如此无用呢？因为福格特只考察 D 线，而没有掌握整个线性光谱的知识。福格特现象论地应用了振子假说的某一方面，而忽略了这一模型的其他的不合理方面，并且有意识地把这个问题留下来不作明确解答。实际上，他并没有十分严肃地对待他的假说。我怕夸克假说的创造者们也同样没有严肃对待他们的假说。关于夸克的统计学问题，关于把它们结合在一起的力的问题，与这种作用力相对

应的粒子的问题，为什么夸克从不作为自由粒子出现的原因问题，夸克粒子在基本粒子内部成对产生的问题，所有这些问题都还或多或少没有作出明确解答。如果人们真要严肃对待夸克假说的话，那末就必须作出关于夸克的动力学和把夸克结合在一起的力的一个准确的数学假说，并证明，至少定性地证明，这些假说可以真正再现基本粒子物理学今天已知的特征。在基本粒子物理学中不应当有不能够应用这个假说的问题。我还不知道有这样的尝试，并且我还怕，每一个这样的用精确的数学语言描述的尝试都会很快导致矛盾。因此，我可以用问题的形式来表述我的反对意见："难道夸克假说对粒子谱的理解比当时福格特的振子假说对原子壳层结构的理解会作出更多的贡献？在夸克假说后面不是又隐藏着那个早被实验否定了的观念，即人们可以区分简单和复合粒子的那个观念吗？

我还想简要地讨论一些专门的问题。如果 SU_3 在粒子谱的结构中起着重要的作用，并且如果根据实验的证据人们必须接受它的话，那末，它究竟是一种作为自然规律基础的基本对称性呢，还是一种从一开始就只是近似地有效的动力学对称性呢，对此作出判定，那就很重要了。如果这个判定悬而未决，那末关于作为粒子谱基础的动力学的一切其他假设都也无法判定，从而人们也不能有更多的理解。象 SU_4，SU_6，SU_{12}，$SU_2\times SU_2$ 等等这种更高的对称性有更大的可能性是属于动力学对称性，它们在描述现象中可能是有用的；但是，它们的启发性价值，在我看来，同天文学中托勒密的本轮和均轮的启发性价值差不多。它们只给出关于基本自然规律的结构的间接结论。

最后还要谈一谈近年来的最重要的实验结果。这就是新近发现的具有比较大的质量（约为30—40亿电子伏）和较长寿命的玻色子。这样的状态在原则上是绝对有人预料到的，就象迪尔（Dürr）

曾特别强调指出过的那样。是否人们可以根据它们的长寿命的特点，近似地把它们解释为由其他已知的长寿命粒子所合成呢，这确实是一个困难的动力学问题，在这个问题中多体物理学的全部复杂性都将起作用。当然，在我看来，为此又一次引进新粒子，把已知对象假设为由新粒子所组成的那种尝试是一种完全无用的思辨。因为这又是错误地提出问题，它无助于对粒子谱的理解。

近年来，人们用日内瓦的储存环和巴达维亚加速器测量了很高能量的质子-质子碰撞的有效总截面。得到的结果是，有效截面大约随能量对数的平方而增长，这种行为早就在有关渐近区的理论中被预测到了。其他粒子的碰撞也得到同样的结果，因此这多少表示，在大加速器中已经到达了渐近区，从而人们在那里不用再期望会有什么令人惊讶的奇迹。

一般人们不应当期望用新实验得到一种"解围的神力"（Deus ex machina)，它可以立即导致对粒子谱的理解。因为近五十年的实验对"基本粒子是什么?"这个问题已经定性地作出了十分令人满意的、不自相矛盾的、完满的回答。至于定量的细节，只能(就象量子化学中那样）随着岁月的流逝通过许多物理学和数学的更为细致的工作来加以阐明，而不可能立即做到。

因此，我能够以一种预期粒子物理学发展将取得成功的乐观的展望来作结束。新的实验结果总是有价值的，它们首先就扩大了粒子的表册；但当它们回答了理论的关键问题时，它们就特别有意义了。在理论中人们必须尝试作出物质的基本的动力学的精确假设，而不带任何哲学的偏见。人们必须充分严肃地对待这个动力学问题，而不应当满足于含糊的假说，而对主要问题不作明确的解答。因为粒子谱只有当人们认识了物质的基本动力学时，才能真正理解；这个动力学是中心问题。动力学以外的一切只是数据表册的一种字面的描述，即使数据表册也许会比字面描述具有更多的

内容。

〔译自西德《自然科学》(Die Naturwissenschaften)
1976 年 1 月号〕

宇宙辐射和物理学中的基本问题

宇宙辐射，自从它在大约六十年前被发现以来，已经在物理学的发展中起了很重要的作用。从第一次证实自外层空间来到地球的射线到发现这种辐射中很高能量的粒子，发现具有意想不到的性质的新粒子，到发现自然规律中新的基本对称性，最后到发现星际空间中残余物质和磁场的大量信息，以及关于可能产生宇宙辐射的那些过程的大量信息，这是一个非常有趣的历史过程。但是我不想追随这条历史线索。

我试图把我的讲话仅限于宇宙辐射的知识进展所接触到的或大大推进了的那些物理学基本问题。我在这个讲话中主要关心的是这个非常特殊的物理学领域和成为整个物理学基础的那些基本问题之间的相互作用。在三十年代初，当宇宙辐射在本世纪最重要的物理发现之一——正电子的发现——中起了必不可少的作用时，这种相互作用就显示出来了。固然，正电子的发现不是在宇宙线研究中最先作出的。狄拉克在他的电子理论中已预言了带正电的电子的对应物，但是关于正电子的存在的第一个令人信服的证据是安德森、布莱凯特和奥基亚利尼(Occhialini)在宇宙辐射中发现的。第一批关于簇射的云室照片(在这张照片上，光子产生了电子和正电子对，而这些粒子当穿过物质时又产生光子)毫无疑问地证实了正电子的存在和狄拉克理论的正确性。不久以后，正电子也在原子核过程中，即在β衰变中找到了。

关于这个发现的基本重要性，我或许还得稍微多说几句。到那时为止，物理学家们或多或少不自觉地遵循古希腊哲学家德谟克利特的哲学。如果一个人试图把一块物质一次又一次地分割下

去，他就会——人们这样推测——最后分到物质的最小部分而告终，这些最小的部分不能再进一步分割了，因此被称为原子。这些原子被认为是物质的不可分的、不能改变的单位，作为构成所有物质的基本单元，而原子(或者如我们今天所说的:基本粒子)应当以它们的相对位置和运动来决定各种各样物质的可见的性质。整个这幅图象，看来似乎合理，却被狄拉克的理论和它的后果——正电子的发现彻底摧毁了。决定性的要害主要不在于存在一种迄今未知的新粒子，——以后还发现了许多新粒子，对于物理学基础并没有严重的影响，要害在于发现了一种新的对称性，即粒子-反粒子共轭，它同狭义相对论的洛伦兹群，也同能量与质量的相互转化密切相关。在非相对论性物理学中，任何一种粒子的数目都是一个运动常数，就象能量和动量一样。在相对论性物理学中，这个数不再是一个合适的量子数了。譬如说，一个氢原子不一定是由质子和电子所组成，它也可以当作是质子、两个电子和一个正电子所组成，尽管后面这种组成仅仅相当于对氢的整个波函数作很小的相对论性的改正。这种状况的后果之一，就是推测在两个粒子的高能碰撞中可以产生大量新粒子，而这些可能性仅受能量、动量、同位旋等守恒定律的限制。又正是在宇宙辐射中，可以检验这种推测。

实际上，在三十年代后期，布劳(Blau)和瓦姆巴歇尔(Wambacher)在很高的高空曝光的照相底片上发现了所谓的“星”，就是在底片的同一点开始发出许多径迹。显然，一个原子核被一个射来的高能粒子击中，由于碰撞的结果，它发射出许多不同的粒子。解释这些“星”不是简单的事，因为过程的开端可能是原子核中的一种级联，这种级联同众所周知的电子-正电子级联相类似，随后就是某种原子核的蒸发。所以这些结果并不立即证实我在前面作出的推测，即仅由两个粒子的碰撞产生了多数的粒子。但是，随着时间的流逝，宇宙线实验能够得到改进，而在十五年之后，多倍地产

生粒子的现象确定不移地实现了。

这些结果意味着"分割"和"组成"的概念只有有限的适用范围。就象相对论中的"同时"概念和量子论中的"位置"和"速度"概念只能在特殊的限制下使用，而当不分青红皂白地用错了地方时就失去意义一样，"分割"和"组成"的概念也只有在特定的情况下才有确定的意义。当一个粒子可以被少量能量分解为两个或几个部分,而粒子的静止质量比这一小份能量来大得很多,这时,也只有这时,人们可以说粒子由这些部分组成,并可分解为这些部分。在所有其他场合,"分割"或"组成"这类词就没有确定意义。而在两个粒子的高能碰撞中,实际发生的事是由动能产生了新的粒子。采取基本粒子的形式,能量变成了物质。但是,"基本"粒子和"复合系统"之间的区分也没有确定的意义。粒子是物理系统"物质"的定态。所有这些很重要而又基本的结果在宇宙线研究中有它们的实验基础。

宇宙线研究的另一个引人注意的结果是1937年尼特迈耶尔(Neddermayer)和安德森发现μ子,即μ介子。这种客体起先被误认为是汤川曾预言过的作为核子间强相互作用的物质对应物的那种粒子。但是不久就弄清楚了，μ子同质子和中子这一类重粒子的相互作用是太小了;μ子不可能承担起原子核中的强相互作用。倒可以说,μ子显得象是电子的较重的哥哥,它同电子的区别仅在于它有较大的质量。μ子的发现并不象正电子的发现那样引起物理学基础发生根本性的变化，但它显示出粒子谱系中的一个有趣的特征。这个谱系被分为两个仅仅微弱地结合在一起的谱项系统，即强子系统和轻子系统。人们从原子光谱已熟悉这种微弱地结合起来的谱项系统。但是，在这两个场合中引起这种分裂的原因是否相似，还是一个没有解决的问题。μ子——加上中微子——组成了宇宙辐射中最有穿透力的部分，因此在确定作为大气高度的

一个函数的宇宙辐射强度中起着重要的作用。

我或许还应当提到另一个颇为奇特的情况，在这里μ子也有助于解决一个很根本的问题。德国在大战前夕，相对论不为当权者所认可，特别是运动物体中的时间的延缓被批评为荒谬的和纯理论的思辨。关于相对论可否在大学中讲授的问题，甚至还举行过审判。在这种争论中，有一次我能够指出μ子的蜕变时间应当同它们的速度有关：以接近光速运动的μ子应当比那些以较小速度运动的μ子蜕变得慢一些。——这是相对论的预言。实验结果证实了这个预言；时间膨胀能够被直接观测到，从而为开设相对论课程开辟了道路。所以我对μ子总是怀有感激之情。

战后不久，鲍威耳在布里斯托发现了π子，它在大多数宇宙线现象中起着很重要的作用。这种客体满足了汤川所表述的强相互作用的物质对应物的全部条件；后来知道，这种粒子不是这类粒子中的唯一的一种，而不过是质量最小的一种强子。不久，差不多在所有高能事件中都发现了它。此外，π子衰变为μ子和中微子，结果也搞清楚了μ子的来源。

就象μ子一样，π子并没有引起物理学基础发生根本性的变化。它只证实了各种各样的粒子都是成体系的物的各种定态，因它们在基本群的变换中的不同行为而有所不同。这些群要比粒子更为根本。

那时，除了相对论的洛伦兹群，只有同位旋群被认为是基本的。它是在1932年联系着原子核物理而发现的；但首先是通过π子，它的基本特性才被完全了解。关于π子的宇宙线实验证明，同位旋群对于强相互作用是严格对称的，而只有电磁相互作用和弱相互作用破坏这种对称性。只要假设构成粒子谱基础的自然定律在同位旋变换下是严格不变的，就可以解释上述结果，而对于这种对称性的偏离是由于不对称的、简并的基态所引起。在固体的量

子力学中，类似的情况是众所周知的。

几乎与发现 π 子同时，在宇宙辐射中也发现了其他一些粒子，它们比 π 子重，而它们的行为有某种“奇异性”。它们有相当长的寿命，数量级为 10^{-10} 秒，因此它们的径迹可以在云室和乳胶中观测到。但是如果只考虑已知的对称性和相应的量子数（重子数、同位旋、角动量），这种长寿命就不能理解。人们所预期的寿命要比这短得多，就此而论，它们的行为是奇异的。正确的解释是 1952 年由派司(Pais)作出的，他引入了一个叫做奇异性的量子数和相应的对称性（或变换性）。这样，宇宙线研究引入了一个新的对称群；并且因为如我在前面所指出的，群比粒子更重要，这又是对物理学基本问题一个很根本的贡献。

当时大多数物理学家普遍同意，如果寿命很短的客体可以被观测到，就可以发现另外的一些粒子。这些粒子不过是成体系的物的一些定态，因此人们可以预期有许多不同的粒子，它们大多具有很短的寿命。这样的客体只能作为所谓共振态而被观测到，而为了这个目的，需要有比宇宙线观测所能提供的更好的统计资料。对于粒子物理学家说来，幸运的是第一批大加速器在当时已经建成并开始运转，这些加速器就是：布鲁克海文的同步稳相加速器、伯克利的高能质子加速器和日内瓦欧洲原子核研究中心(CERN)的质子同步加速器。在此后的一个长时期内，粒子物理学的重要结果都是用大加速器得到的，而宇宙线研究把它的注意力主要转向天体物理学问题。这种发展趋势是不可避免的，但并不总是符合粒子物理学家的愿望；这是一个可悲的转变。

浪漫的时期过去了，在那个时期，在高海拔的高山实验室对云室照片的研究，可以同滑雪和登山相结合，或者，气球实验可以象我们的意大利朋友所做的那样，在意大利海军的飞机和军舰的支援下，从地中海的一个风景秀丽的岛屿出发。无疑，地中海和煦的

太阳对科学实验的成功已作出了贡献。但是，这个欢乐的时期现在已经一去不复返了，粒子研究必须在大加速器机构的“干巴巴的”气氛中进行。

在天体物理学中，宇宙辐射成了一个很有价值的新工具，它有可能在恒星的可见光和红外光所得的信息之外提供新的信息。第一个问题当然是宇宙辐射的起源。福尔布希（Forbush）已经认识到，宇宙辐射的某些低能部分偶尔也从太阳发射出来，就是从太阳表面的某种湍流现象发出。但是很快就知道，要对宇宙线的起源问题作确定的回答，需要对恒星之间、我们的行星系中（这里我可以提醒你们注意比尔曼（Biermann）最先讨论的太阳风）、我们的银河系中、最后在河外空间中的等离子体的电磁场有充分的知识。对这些电磁场的研究成了近年来天体物理学的中心部分，并且利用宇宙辐射已得到了许多信息。关于它的起源，现在普遍的意见似乎是：超新星和它们的遗骸脉冲星是高能宇宙线的主要来源。但是，我不想深入探讨天体物理的细节，而想回到我最初提出的问题：宇宙辐射在哪些地方触及了物理学的基本问题？

我刚才提到了脉冲星，它属于迄今为止观察到的具有最大密度的恒星。它们的物质密度可以和原子核的密度相比较。它们由引力聚集在一起。这样的恒星引起了两个基本问题：一个涉及物质中引力和其他相互作用力之间的关系；另一个涉及到那种较高密度甚至更高密度的物质的状态方程。但在我进入讨论这些问题之前，我还想提一下，甚至在有了大加速器的时代，宇宙线研究对粒子物理学的很重要的问题也有几个很有价值的贡献。

宇宙辐射的粒子具有高达 10^{19} 电子伏的能量，显然这样高的能量是加速器所不能达到的，至少在最近的将来是不可能达到的。因此，对于这样极高能量的粒子的碰撞只能在宇宙辐射中加以研究。即使低的强度和很少的统计资料不利于得到准确的结果，但还

是提出了这样的问题：簇射的截面和其他特性在极高能量范围内应当怎样随能量而变化？在远远超过普通粒子和共振态的能量的地方，是否有一个渐近区，在那里不会发现或预料不会出现比较惊人的新事件或比较剧烈的变化吗？从宇宙辐射所得到的关于这个问题的信息不过是一个模糊的提示，但它还是刺激了理论研究，这种研究在二十多年前导致了这样的推测：任何强子的整个碰撞截面在高能时应当随能量的对数的平方而增加。因此应当有一个渐近区，但是在这个区域中，整个截面不应当是常数，它们应当按照对数的比例而增加。这种推测已在最近用欧洲原子核研究中心的储存环和用巴达维亚加速器所做的实验中得到证实。渐近区域似乎在系统的质量中心从100亿电子伏数量级的能量开始，在欧洲原子核研究中心的储存环中已得到500亿电子伏质子-质子碰撞。巴达维亚加速器的主要贡献是得到这样的结果：对于π子或K子和质子的碰撞也可以观察到对数增加。这对于有一般的渐近区的假设是一个强有力的有利论据，而且这种渐近区在这些实验中已经达到了。为了理解这种渐近区，把粒子描述为连续物质的近乎球状的云就足够了，而丝毫不用涉及组成这些云的粒子本身。这是可以令人满意的，因为“组成”一词在粒子物理中通常已失去它的意义。

近十年来，另一个问题占据了粒子物理学家的思想。我们知道SU_3群在粒子谱中起着一种近似对称性的作用。SU_3的最简单表示是三维的，因此人们可以期望对应于这种表示应该有三个粒子组成的三重态；这些粒子的电荷是基本电荷的1/3或2/3，它们的名称叫“夸克”。可是，这样的粒子在用大加速器做的实验中从未观察到过。因此，人们设想，夸克也许相当重，它们由很大的结合能结合在一起，所以现有的加速器还不足以把它们分开。在这一点上，宇宙辐射又显得很有用了，因为宇宙辐射的原始射线的能量可

以比大加速器的最大粒子能量大几千倍甚至更多倍。甚至在宇宙辐射中也没有发现过夸克这一事实，是不存在夸克的一个很有力的论据。如果这样的结果是最终的结果，在我看来，对于“质子由三个夸克组成”这种说法很难给予任何确定的意义，因为不论是“组成”一词或“夸克”一词都没有确定的意义。那末这样的一个句子怎么能够解释呢？对于其他一些预言过但未发现的粒子，W 介子、部分子、胶子、磁单极子、粲粒子，同样的怀疑也是正确的。[①]如果它们不论是在大加速器中或是在宇宙辐射中都不能被观测到，那就难以证明它们在现象论描述中是适宜的概念。这里我们所遇到的状况是量子力学中早已熟悉了的。我们的日常语言引导我们问一些毫无意义的问题。例如，“电子绕原子核运动的轨道是怎么样的？”由于测不准关系，不论“轨道”一词或者“运动”一词，都得不到明确的定义，因此这个问题没有意义。

这把我引导到一个和宇宙辐射中的经验紧密联系的中心问题。但在我讨论问题的经验方面之前，我想先说明一下它在粒子物理学和一般物理学中的基本重要性。

从近几十年来的实验，我们知道，不同的粒子正是成体系的物的不同定态。它们用量子数表示其特征，或者，如果你愿意，也可以用它们在基本群下的变换性质来表示其特征。粒子物理学的理论上的理解只能意味着对粒子谱的一种理解。铁的光谱中单独一条谱线是无法理解的，但是整个光谱却是可以理解的，它可以归结为一个包括 26 个电子和这个铁原子核的系统的薛定谔方程。

光谱的理论解释的基本要素是众所周知的，并且从经典物理学和量子力学都可以学到。我们可以设想一条弦的弹性振动，或

① 1974 年，粲粒子已被发现。1979 年，实验提供了胶子存在的初步证据。——译者注

者在一个空腔中的电磁振动，或者一个原子的定态，譬如说铁原子的定态。在所有这些例子中，我们首先需要一个关于系统的动力学性质的准确陈述，然后我们必须加上特殊的边界条件。在弦的例子中，弦的弹性和动力学性质的精确的数学表述是第一步；然后，通过陈述弦在哪里固定，我们就可以算出振动谱。关于空腔中的电磁振动，麦克斯韦方程确定了系统的动力学性质。边界条件由空腔的形状给定。由于问题的复杂性，常常不能准确地计算整个谱。但对于最低的一些振动，人们应当能够得到合适的近似结果。关于铁原子，它的动力学性质是由量子力学来规定的，那就是由薛定谔方程来规定。加上波函数必须在无穷远处等于零这样一个补充条件，这些定态就确定了。如果原子被封闭在一个很小的盒子中，这些定态就会不同。

从这些类比出发，很清楚，理解粒子谱系的首要条件是物质的动力学的精确的数学表述。显然，粒子这个词不应当进入这个表述。因为粒子是后来由成体系的物的动力学结合上边界条件来定义的；粒子是次级结构。在宇宙中，在我们的周围粒子谱无疑地可以不同于很稠密的中子星的内部，因为在这两个场合中边界条件是不同的。因此可以看出物质动力学的基本重要性，问题在于我们怎样才能掌握它的数学表述。

既然粒子概念在这里没有什么用处，动力学定律的群性质必定起决定性作用。譬如说，振动弦的动力学定律对于时间的移动和沿弦的位置移动是不变的，对于绕弦旋转也是不变的。由于边界条件，第二个不变性被破坏了，第三个不变性通常不被破坏。至于空腔中的电磁振动，对于整个洛伦兹群，动力学定律是不变的：这个不变性只是部分地被边界条件破坏。

对于物质的动力学，已经知道一些主要的不变性：洛伦兹群和同位旋群 SU_2。标度群可能也应该算在基本的不变性中。但我不

想深入探讨动力学定律的这些对称性的细节。我宁愿回到宇宙辐射上来。宇宙辐射研究，或者更一般的天体物理学研究，怎样能对我们关于物质的动力学知识作出贡献呢？

首先谈一谈因果性。我们从色散关系知道，物质的相互作用遵循因果律。这句话的严格的数学表述或许还不完全知道，但我们有可靠的理由认为相互作用可以表述为局部的相互作用，比如就象在量子电动力学中那样。非局部的库伦力同这句话是相容的。从这样一种状况出发，说极高密度物质的研究应该给出关于这种局部相互作用的最直接的信息，从而也给出关于物质的动力学的最直接的信息，这似乎是合理的。

在中子星中，密度和原子核是同一个数量级。在这样的密度时，说原子核由若干核子组成还是有意义的。因为以小量的能量——与一个原子核的静止质量相比是小的——就足以把一个质子或一个中子从原子核中打出。核子在原子核中相互距离仍然很远，即它们的相互作用能量比它们的静止质量小。这在中子星中同样正确，因此有可能对这样的星体物质的状态方程作出估计。可是，如果密度还显著提高，例如在更大质量的恒星中由于引力收缩，那末恒星由什么粒子组成的问题就没有确定的意义了。提供给一个粒子的空间将小于它的正常大小，因此它不可能具有它的正常质量；相互作用是如此强烈，以致粒子通常不在它们的质量壳层上。换句话说，人们只能说所有粒子的一种混合物，而这时说它是连续物质则更为合理。正是这种连续物质的动力学行为是粒子物理学中的基本问题。

如果不仅能够得到关于中子星中的状态方程的更多信息，而且特别是还能得到关于更高密度恒星中的状态方程的更多信息，那末这对于理解物质的动力学行为就会是极端重要的。究竟是宇宙辐射中的观测还是天体物理学的更广阔领域的观测会更有用

处，对此我不能作出判断。我只想强调这个问题的重要性。

宇宙辐射中还有另一个特殊领域，在这个领域里关于物质的动力学这个问题可以从一个完全不同的方面来着手处理。如果两个极高能的粒子相碰撞，那末，在碰撞的最初的瞬间，就会有一个物质密度极大的小盘，然后它发生爆炸，并且随着它的密度的减小，最后蜕变为许多粒子。这就是众所周知的粒子的多重产生的过程，碰撞的粒子的能量愈高，这种过程当然就愈有意义。如果原始宇宙线粒子有 10^7 亿电子伏，那末在碰撞中，开始时的盘的密度可以比中子星中的密度大一千倍。

由此可见，这种极高能量的宇宙线簇射行为的研究会给出关于物质动力学的很有价值的信息。这方面令人感到鼓舞的是，在欧洲原子核研究中心的储存环中和在巴达维亚加速器中，人们似乎已经到达渐近区，或者至少已接近渐近区。对于这个区域中碰撞的初始阶段，初级粒子可以简单地形象化为连续物质云，其密度在表面按照指数的比例而下降。这个模型解释了总截面作为能量增加的函数是对数增加的。我还要指出两类实验的特征性的差别，一类是在极密的恒星上，另一类是在很高能粒子碰撞后的盘上。在第一种场合，引力起重要作用，在第二种场合，引力是不重要的。因此这两类实验能够给出两种不同类型的有关信息。

在结束时我要回到我报告开始时提到的一般问题，我或许应当说，宇宙辐射在整个物理学领域中的特殊作用是基于两类事实的。这种宇宙辐射含有最小尺度物质行为的信息，而且也对我们关于宇宙——最大尺度的世界——结构的知识作出了贡献。这两个极端都是不可能直接观测到的，它们只能用很间接的推理来考查。在这里，日常生活的概念必须代之以别的相当抽象的新概念。只有这样，我们才会懂得象“极端”或“无限远”这类词在涉及自然界时能够有什么意义。在这个意义上，宇宙辐射仍可以（不管实验

形式有什么变化)称为一门很浪漫的、很鼓舞人心的科学。

〔译自西德《自然科学》(Die Naturwissenschaften)

1976年2月号,许良英校〕

译 后 记

本书作者韦纳尔·卡尔·海森伯（Werner Karl Heisenberg，1901—1976）是当代最卓越的理论物理学家和原子物理学家①之一。1976 年，物理学家维格纳在悼念海森伯的文章中说："没有一个活着的理论物理学家在这个领域内比他贡献更大。"②海森伯是量子力学的创始人之一。他为原子、原子核、基本粒子物理学的发展奋斗了终生。他是继玻尔之后的哥本哈根学派的主要代表人物。

海森伯于 1901 年 12 月 5 日生于德国维尔茨堡。原子物理学也正是在这前后诞生和开始发展起来的。1911 年他到慕尼黑上中学。1919 年他首次接触到原子概念。③ 1920 年他进入慕尼黑大学随原子物理学家索末菲等学习物理学。卓越的物理学家泡利是他的同学和挚友。

索末菲虽然是一个杰出的物理学家，但不是一个哲学家。他在 1922 年写信给爱因斯坦说："我只能促进量子的技术，您必须研究它的哲学。"④ 所以，海森伯不能从索末菲那里学到量子论的哲学，他是以后从哥本哈根学派的首领玻尔那里学到量子论的哲学的。

1922 年 6 月，玻尔到哥丁根大学作有关原子的量子论和元素

① 这里所说的原子物理学是广义的，包括原子、原子核和基本粒子物理学。海森伯经常自称为原子物理学家，也是在这个意义上理解原子物理学一词的。

② 美国《今日物理学》月刊，1976 年 4 月号，第 86 页。

③ 参见海森伯：《物理学和其他——会晤和对话》，伦敦，1971 年，第一章。

④ 转引自 A. 赫尔曼：《海森伯》，汉堡，1977 年，第 19 页。

的周期系的一系列讲演，这被称之为“玻尔的节日”。海森伯也随老师索末菲前去听讲。在一次讲演会中，二十一岁的大学生海森伯对原子物理学权威玻尔关于塞曼效应的解释表示了不同的意见，引起了玻尔的注意。会后，玻尔邀海森伯一起散步长谈。海森伯回忆说:“这是我能够回忆起来的关于现代原子理论的基本性物理学问题和哲学问题的第一次透彻的讨论，它当然对我以后的生涯有决定性的影响。我第一次理解到玻尔关于原子理论的观点远比当时其他物理学家——例如索末菲——的观点更具有怀疑论的精神，而他对理论结构的深刻理解不是对基本假设作数学分析的结果，确切地说是由于大量占有关于实际现象的材料，从而使他有可能直观地理解现象之间的联系，而不是从这些现象形式地推导出其间的关系。……玻尔首先是一位哲学家，而不是一位物理学家，但是他理解我们当代的自然哲学只有当它的每一个细节都能够经受得住无情的实验检验时才是有力量的。”① 尽管海森伯从不自认为唯物论者，但在我们看来，他的上述论点是完全符合自然科学的唯物主义传统的，这对他一生的科学工作确实有决定性的影响。

在索末菲的指导下，海森伯通过对湍流的研究于1923年7月获得了博士学位，之后就到哥丁根大学作玻恩的助手。1924年3月，他第一次访问了哥本哈根。7月，他在哥丁根大学取得授课的资格。1924年底到1925年初，他到哥本哈根在玻尔指导下从事研究。以后，他又回到哥丁根。1925年6月，他在因枯草热病到海利戈兰特疗养期间第一个创建了矩阵力学——量子力学的一种形式体系，发表了题为《关于运动学和力学关系的量子论的重新解释》的一篇物理学史上划时代的论文。

① 原载《玻尔纪念文集》(阿姆斯特丹，1967年)，转引自凡·德·韦尔登编:《量子力学原始论文集》，阿姆斯特丹，1967年，第22页。

在创建矩阵力学的过程中，海森伯遵循了自然科学的唯物主义传统。他从原子物理学大量实验结果（主要是原子光谱中里兹组合原则、弗兰克-赫兹的原子电子碰撞实验、玻尔频率关系等）所揭示的辐射和原子能级的不连续性(即量子性)出发来建立他的理论，又以实验结果来检验他的理论。结果表明，量子力学不仅能够解释旧量子论能够解释的实验结果，还能够解释旧量子论所不能解释的许多实验结果(例如氦光谱特征、带光谱中半量子数的存在、光电子的连续空间分布和放射性蜕变现象等)。

海森伯创建矩阵力学的指导思想是"在原子领域内，经典力学不再有效"。他反对他的老师玻尔、索末菲等先验地把经典力学中的位置、速度、轨道概念强加给原子中的电子，而主张代之以原子光谱的频率、波长、强度等可观测量。他这样做，自称是受到马赫的实证论哲学的影响。① 实际上他在这里是应用了经验论，反对了唯心论的先验论。

海森伯的矩阵力学应用并推广了玻尔提出的对应原理。对应原理要求：量子理论得到的结果对于大量子数应当收敛于经典力学得到的那些结果。从 1918 年到 1925 年，玻尔等物理学家在旧量子论中运用对应原理，通过天才的猜测和人为的拼凑，已得到许多重要的结果。海森伯的重大贡献是把对应原理推广到整个力学体系。当量子数很大或普朗克常数可以略而不计时，量子力学的公式就趋近于经典力学的公式。这样，海森伯就把猜测性的、零散的量子论发展成为一个逻辑一贯的、严密的形式体系。它反映了原子层次微观客体的基本运动规律，并揭示了它与宏观客体基本运动规律之间的联系。

在海森伯首创矩阵力学以后，他又和玻恩、约尔丹协作，继续努力发展矩阵力学。1926 年，奥地利的卓越物理学家薛定谔在德

① 海森伯：《物理学和其他——会晤和对话》，伦敦，1971 年，第 64 页。

波罗意的物质波假说的基础上，将波动力学与经典力学的关系类比于物理光学与波动光学的关系，从而创建了波动力学，提出了以他命名的薛定谔方程。以后不久，薛定谔又证明海森伯、玻恩、约尔丹创建的矩阵力学和波动力学是等价的，可以通过数学变换从这种形式转化为另一种形式。同年，波恩指出了薛定谔方程中的 ψ 函数可以给出大量微观客体性状的统计分布或是单个微观客体具有某种性状的几率。

1927 年 3 月，海森伯发表了《量子论运动学和力学的直观内容》一文，提出了著名的测不准关系(又名不确定原理)。海森伯不回避矛盾，敢于承认微观客体具有波粒二重性，它们不同于经典物理学中的粒子，也不同于经典物理学中的波，应用经典的波或粒子图象来描述微观客体时，必须受到测不准关系的限制。

接着波尔就提出了互补原理。这个原理认为，对于微观客体，波动图象和粒子图象是互相排斥的，但是又相互补充。关于微观客体位置的知识和动量的知识(又如时间的知识和能量的知识)是互补的(既相互排斥，又相互补充)。关于原子事件的时空表示和它的决定论性因果描述是互补的(既相互排斥，又相互补充，即统计地关联起来)。关于互补原理的作用，至今仍存在许多不同的意见。但它承认矛盾的两极，多少有点辩证法的因素，对冲破经典物理学中机械决定论观念的束缚也起了积极作用。海森伯在 1958 年也曾指出:“在量子论的认识论分析中，尤其是在玻尔所给予它的形式中，还包含着许多会使人想起黑格尔哲学方法的特征。”①

1927 年秋，26 岁的海森伯成为莱比锡大学理论物理学教授，被人称为“德国最年轻的教授”。在他和德拜周围，先后聚集了一批杰出的青年物理学家(如布洛赫、洪特、派埃尔斯、斯莱透、泰勒、韦斯科夫、威札克尔等五、六十人，我国物理学家王福山也曾在莱

① 海森伯:《跨越边界》，纽约，1975 年，第 18 页。

比锡学习)。[①] 他们把量子力学推广应用到分子结构理论、原子核物理、固体物理、金属的电磁性等等方面，作出了巨大的成绩，犹如一次所向披靡的凯旋进军。海森伯本人就在铁磁性理论方面作出了重要贡献。莱比锡的这支队伍成了哥本哈根学派的重要支柱。

1929 年，海森伯曾到美国、日本、印度讲学，1930 年出版了以芝加哥讲演稿为基础的《量子论的物理原理》一书，宣扬量子论的“哥本哈根精神”，在国际物理学界有广泛的影响。他成了以玻尔为首的哥本哈根学派的主要代表人物。

1932 年 5 月，英国物理学家查德威克发现了中子。接着海森伯和两个苏联物理学家分别独立地提出了原子核由中子和质子组成的理论。就在这一年，海森伯因创建量子力学(矩阵力学)和提出测不准关系而获得诺贝尔物理学奖。

1933 年，希特勒上台，给德国的科学带来深重的灾难。许多杰出的犹太族科学家受到残酷迫害，纷纷逃亡。莱比锡的科学队伍也逐渐离散。爱因斯坦创建的相对论被当作犹太人的物理学险遭取缔。“运动物体中时间的延缓被批评为荒谬的和纯理论的思辨”。[②] 1937 年，海森伯因支持相对论也遭到纳粹分子的攻击。那时，海森伯正从事宇宙线的研究。他根据相对论，认为 1937 年发现的 μ 子的蜕变时间应当同它的速度有关。实验结果证实了这个预言，“从而为〔大学中〕开设相对论课程开辟了道路”，所以海森伯“对 μ 子总是怀有感激之情”。[③]

1942 年，海森伯担任柏林大学教授并兼任威廉皇家物理研究所所长。在这时期他参加领导研制重水型原子反应堆的工作。在二

---

① 参见玻普编:《海森伯和当代物理学》，西德布朗施魏格，1961 年，第 5—7 页。

② 海森伯:《宇宙辐射和物理学中的基本问题》，西德《自然科学》月刊 1976 年 2 月号，见本书第 202—203 页。

③ 同上，第 203 页。

次大战期间，他发表了《原子核物理学》（1943 年）一书，编辑出版了《宇宙辐射论文集》（1943 年）。1945 年 5 月，他和德国其他一些科学家一道被美国军队俘至英国，到 1946 年才获释返回西德。

二次大战以后，海森伯积极为恢复发展西德的科学事业而努力。他参加了重建威廉皇家学会（1948 年以后改名为普朗克学会）及所属研究机构的工作，担任哥丁根大学教授兼普朗克物理研究所所长。1958 年以后到 1970 年，他担任慕尼黑大学教授兼普朗克物理和天体物理研究所所长。自 1949 年以后，他曾先后担任德意志科学研究委员会（DFR）主席、德意志科学研究联合会（DFG）主席、洪堡基金会主席、普朗克学会副主席、西德政府原子问题部顾问等职。

在科学研究工作方面，海森伯自 1957 年以后，主要从事基本粒子统一场论的研究。最初他和泡利合作。但到第二年泡利就放弃了这项艰巨的工作并于年终因病逝世。以后，海森伯就和青年物理学家迪尔（海森伯和泰勒的学生）一起从事这项工作。海森伯坚持这项工作直到他去世之日。在这方面海森伯发表了《基本粒子理论导论》（1962）、专著《基本粒子统一场论导论》（1966）。

海森伯在基本粒子统一场论中把所有的基本粒子都看成是同一的原始物质的不同形象（海森伯认为这种说法和赫拉克利特的哲学有相同之处①）。原始物质可以用旋量场表示，并满足一个叫做宇宙方程的非线性方程。他希望从解这个方程能推导出各种基本粒子的存在和性质。他在 1970 年发表的《物理学的终结？》一文中谈到："基本粒子物理学有必要寻求一个新的更加全面的理想形式，它应当把相对论和量子论作为极限情况，它应该说明复杂的基本粒子谱，就象量子力学能够说明比如铁原子的复杂光谱一

① 海森伯：《跨越界限》，纽约，1975 年，第 22 页。

样。"[①] 他在《基本粒子统一场论导论》中指出：基本方程并不完全决定所有其他物理部门的定律。例如，电磁定律、放射性和引力还同宇宙模型、大尺度宇宙结构这些有关基态的边界条件有关。而且宇宙方程也不可能包含与生命有关的复杂现象。所以，海森伯认为，建立基本粒子统一场论并不意味着物理学的终结。

1975年3月5日，海森伯在德意志物理学会年会上作了题为《基本粒子是什么？》的报告。(见本书第185—199页。)他认为，到了基本粒子层次，"基本粒子和复合粒子的区分从此根本消失了。""分割"与"组合"等词已失去了意义。他反对把电子、质子等又看成是小行星系那样的复合系统，他反对近年来取得相当进展的"夸克"假说。他强调探索物质的基本的动力学。海森伯和迪尔的这条研究路线是否能够取得成功？这只能有待于今后关于基本粒子的理论研究和科学实验来作出恰当的结论。

1971年海森伯70寿辰时，他的学生、好友、天体物理学家和哲学家冯·威札克尔评价了他一生的工作："他的物理学工作有两个主题：量子力学和统一场论。量子力学象是一次胜利凯旋的进军，统一场论则是一场消耗实力的阵地战。"[②] 海森伯在晚年虽然不象青年时代那样取得丰硕的成果，但他在统一场论探索性研究中不畏艰险、勇于登攀的追求科学真理的精神是值得我们敬仰和学习的。

海森伯不仅是一位物理学家，也是一位哲学家。他十分重视古典哲学的钻研和物理学哲学问题的探讨。他曾说："一个人没有希腊自然哲学的知识，就很难在现代原子物理学中作出进展。"[③] 他写了不少有关物理学哲学问题的著作，其中主要的有：《自然科

① 海森伯：《跨越界限》，纽约，1975年，第189页。

② 《量子和场：海森伯七十寿辰时的物理和哲学考察》，布朗施魏格，1971年，第15页。

③ 海森伯：《物理学家的自然观》，纽约，1958年，第61页。

学基础的变迁»(1935 年初版，1973 年第 10 版，英译本改名为«原子核科学的哲学问题»，中译本名为«严密自然科学基础近年来的变化»，上海 1978 年版，比原书增加了几篇重要的文章)，«当代物理学的自然观»（1955 年初版，英译本改名 «物理学家的自然观»)，«物理学和哲学——现代物理学中的革命»(1958年初版，中译本即本书)，«部分与整体»(1969年初版，英译本改名为«物理学和其他——会晤和对话»)，«跨越界限»(1971 年初版)等。

海森伯对哲学问题的探索是和他从事的原子物理学研究密切结合的。在创建和发展量子力学的时期，他的哲学观点受到马赫的实证论的深刻影响。海森伯的怀疑的经验论倾向对他反对唯心主义的先验论、反对十九世纪支配物理学界的机械唯物论观点起了积极作用。他反对把原子和亚原子客体看成是僵硬不变的、惰性的微小粒子，而是具有波粒二重性那样的东西。他认为不能要求经典物理学的机械决定论规律在原子世界继续有效，这些都是有积极意义的。他强调人必须能动地通过宏观仪器对微观客体的变革(他称之为不可控制的干扰)来认识微观客体，人必须用数学语言补充日常生活(宏观世界)中形成的语言概念来描述微观世界的面貌，这些对发展哲学的认识论也是有启发性的。

但是，海森伯进一步认为:“在允许把世界区分为主体和客体（观察者和被观察者）从而明确地表述因果律”这一点上，“量子论开始遇到了困难”①。“我们已经把一个主观论因素引入了这个理论”，“所发生的事情依赖于我们观测它的方法，或者依赖于我们观测它这个事实。”（本书第 18 页）“因果律在量子论中不再适用”，“因果性只有有限的适用范围。”(本书第 48、50 页)事实上，海森伯有时也不得不承认“自然界先于人类而存在”，“自然界在某种

① 海森伯:«量子论的物理原理»，纽约，1949 年，第 2 页。

程度上独立于人类而存在”,[1] 可是他仍然强调人先于自然科学而存在,自然规律的概念不可能是完全客观的。在这里,海森伯忽略了,经过实践检验证实的自然规律,是具有客观实在性的,是不以人的意志为转移的。单个微观客体的运动,虽不服从决定论规律,但大量微观客体的系综,或单个微观客体的波函数,仍服从决定论规律。这说明,单个微观客体的运动虽具有一定偶然性,但仍受到薛定谔方程的决定论规律所要求的必然性的制约,所以,对于微观客体,不能说不存在因果关系,只是不存在决定论的因果关系罢了。

在五十年代末,海森伯开始研究基本粒子统一场论,他的哲学观点在这一时期也有相应的转变,由经验论转向唯理论,由马赫的实证论转向柏拉图的客观唯心论。正如他在本书中所写:“量子论的哥本哈根解释决不是实证论的。因为实证论所根据的是观察者的感官知觉,以此作为实在的要素,而哥本哈根解释却把可以用经典概念描述的(即实际的)事物和过程看作是任何物理解释的基础”。(本书第 93 页)但他并没有从实证论转向唯物论,因为他认为不能把唯物主义的本体论“外推到原子领域中去”(本书第 93 页)。他说:“但是近几年来的发展事实上非常清楚地再现了——如果我们一定要和古代哲学作比较的话——从德谟克利特转向柏拉图的转移。正是普朗克的发现实际上给我们这样一种启示,即物质的原子结构在自然定律中能够被理解为数学结构的表示。”[2]

结合基本粒子统一场论的研究,海森伯对一与多、单纯与复合、组合与分割、整体与部分、质料与形式等一系列对立的基本哲学范畴作了深入的探讨,是富有启发性的。他的主张物质统一性的观点接近于赫拉克利特。他反对德谟克利特的原子论观点,而倾向于柏拉图和亚里斯多德的物质无限可分的观点。但是海森伯

① 海森伯等:《论现代物理学》,纽约,1961 年,第 26 页。

② 《跨越界限》,纽约,1975 年,第 18 页。

在反对德谟克利特的机械的原子论的同时，把他的唯物论也给否定了，而倾向于柏拉图的客观唯心论，把理念、形式看得高于物质或物质的存在物，说什么“物自体最终是一种数学结构”（本书第50页），“基本粒子最后也还是数学形式”（本书第35页），“原始的东西不再是物质的客体，而是形式，是数学对称性，……是理智的内容，……‘意义是万物之始’——逻各斯。”① 我们不否认，在特定的条件下，形式对内容、精神对物质可以起决定的、主导的作用。但由此夸大到把形式、精神看作是万物的原始，那就把形式与内容、精神与物质的根本关系给颠倒了。

因为海森伯是结合当代原子物理学的研究来探讨哲学问题的，所以他的哲学充满着丰富的、活生生的内容。尽管他对有些命题作了片面、夸大、自相矛盾的表述，我们仍应该深入地去研究、分析、鉴别，以便吸取其中的合理的内核。

本书《现代物理学和哲学——现代科学中的革命》是海森伯根据1955—1956年冬季在圣安德鲁兹大学的吉福特讲座上的讲稿整理发表的，于1959年出版。本书是作者最系统的一本哲学著作，也反映了他从经验论向唯理论、从实证论向客观唯心论的转变。中译本还增选了海森伯晚年所写的《科学真理和宗教真理》（1973）、《量子论历史中概念的发展》（1975）、《基本粒子是什么?》（1975）、《宇宙辐射和物理学中的基本问题》（1976）这四篇文章，以供关心现代物理学的历史及其哲学问题的读者参考。此书的翻译与出版，曾得到于光远、许良英、陈步、龚育之、高崧、吴伯泽、吴儁深等同志的关心与帮助，特在此表示深切的谢意。

译　　者

1980年9月于北京

① 海森伯等:《论现代物理学》，纽约，1961年，第19页。